



INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CAROLO WILHELMINA
ZU BRAUNSCHWEIG

Prüftechnologie des Betonkriechens bei erhöhter Temperatur und veränder- licher Feuchte im instationären Zustand

Forschungsbericht

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. H. Budelmann

August 1985

Gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des
Landes Niedersachsen

Inhaltsverzeichnis

1. Problemstellung und Ziel

2. Probleme der Prüftechnik des Betonkriechens unter instationären thermisch-hygrischen Bedingungen

2.1 Größe und Gestalt der Probekörper

2.2 Klimatisierung der Probekörper

2.3 Belastungs- und Lastkonstanthaltungseinrichtung

2.4 Meßsystem für Betonverformungen

2.4.1 Auswahlkriterien

2.4.2 Mechanische Aufnehmer

2.4.3 Dehnmeßstreifen

2.4.4 Induktive Aufnehmer

2.4.5 Andere Aufnehmertypen

2.4.6 Verformungsmessung im Betoninneren

3. Zur Ausführung der Prüfeinrichtung

3.1 Probekörper

3.2 Prüfstand und Lasteinrichtung

3.3 Klimatisierungseinrichtung

3.4 Meßsystem

4. Zusammenfassung

5. Literatur

Anhang: Stückliste und Konstruktionszeichnungen für Prüfstand und Lasteinrichtung

1. Problemstellung und Ziel

Bei zahlreichen Betonbauwerken treten im Betrieb erhöhte Temperaturen auf. Hierzu Beispiele: Reaktordruckbehälter, Wärmespeicherbecken, Off-Shore-Öltanks, Meerwasserentsalzungsanlagen, Kläranlagen, Kühltürme.

Durch die Einwirkung erhöhter Temperatur, hier bis ca. 95 °C, werden zahlreiche Eigenschaften von Beton nachteilig beeinflusst. So zeigt Beton bei erhöhter Temperatur und konstant einwirkender Dauerlast eine deutlich höhere Kriechverformung als bei atmosphärischem Klima. Die Betonfeuchte, schon bei Normaltemperatur ein wichtiger Parameter für das Kriechen, erlangt bei Temperaturerhöhung noch zunehmende Bedeutung.

Vor allem im Zuge der Reaktorforschung hat man sich mit dem Betonkriechen bei erhöhter Temperatur befaßt und zwar unter den für dickwandige Querschnitte zutreffenden thermischen und hygrischen Randbedingungen. Dies sind i.w. konstante erhöhte Temperaturen und im Querschnittsinnen eine unveränderliche Betonfeuchte, bzw. in randnahen Querschnittsteilen die "freie Trocknung" in die Umgebungsluft. Unveränderliche Betonfeuchte wurde in Versuchen mittels der Versiegelung von Probekörpern erreicht.

Die für dickwandige Reaktordruckbehälter vorliegenden, i.w. stationären Klimaverhältnisse treffen für dünnwandigere Betonbauteile von z.B. Wärmespeicherbecken sowie von anderen eingangs genannten Bauwerken nicht zu. Dort liegt i.a. folgende Situation vor:

- a) keine "massigen" Bauteile,
- b) betrieblich bedingte, veränderliche Temperaturen zwischen ca. 20 °C und 95 °C (vorherrschend instationäre Temperatur),
- c) meist hohe, jedoch auch geringere und wechselnde Umgebungsfuchtigkeit bis zur Sättigungsfeuchte.

Der heutige Kenntnisstand über das Betonkriechen unter diesen Umgebungsbedingungen ist unzureichend. Erste Untersuchungen haben gezeigt, daß das Kriechen unter instationärer Temperatur ein Mehrfaches dessen betragen kann, das man bei konstant einwirkender Temperatur mißt, z.B. /8, 14/. Der Einfluß der Feuchte bei Temperaturänderung, nämlich bei einer Trocknung, Befeuchtung oder Konstanthaltung ist gänzlich unbekannt. Wegen der Kopplung von Wärme- und Massetransport ist jedoch ein deutlicher Einfluß zu erwarten.

Eine Ursache für den unzureichenden Stand der Forschung zum Betonverformungsverhalten unter instationären thermisch-hygrischen Bedingungen ist das Fehlen einer geeigneten und zuverlässigen Versuchstechnik. Es ist daher die Aufgabe dieses Forschungsvorhabens, eine Versuchs- und Meßapparatur zu entwickeln und zu erproben, die geeignet ist:

- a) relevante Umgebungsbedingungen zu simulieren,
- b) einachsige Druckspannungen in Betonproben zu erzeugen und auch bei instationärer Temperatur langfristig konstant zu halten,
- c) Betonverformungen bei instationärer Temperatur und ggf. hoher Luftfeuchtigkeit langfristig zuverlässig und reproduzierbar zu messen.

Damit sollen Grundlagen für systematische Kriechuntersuchungen bei den genannten Klimabedingungen geschaffen werden.

2. Probleme der Prüftechnik des Betonkriechens unter instationären thermisch-hygrischen Bedingungen

2.1 Größe und Gestalt der Probekörper

Hinsichtlich der Größe und Gestalt der Probekörper gelten zunächst die Kriterien, die auch für Prüfungen bei üblichen klimatischen Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen sind, wie z.B. Größtkorndurchmesser des Zuschlags und Probekörperschlankheit. Da hier außerdem den besonderen Bedingungen bei erhöhter veränderlicher Temperatur und Feuchtigkeit Rechnung getragen werden muß, sind an die Probekörper zusammenfassend folgende Forderungen zu stellen:

- a) Der Größtkorndurchmesser der Betonzuschläge ist so zu wählen, daß er repräsentativ für einen realen Bauwerksbeton ist. Für Konstruktionsbetone für nicht ausgeprägt filigrane oder außergewöhnlich hoch bewehrte Bauteile wird üblicherweise ein Größtkorn mit 16 mm Durchmesser verwendet. Daneben ist die Forderung zu erheben, daß die kleinste Probekörperabmessung mindestens das 3- bis 4-fache des Größtkorndurchmessers betragen soll, um eine ausreichende Verdichtbarkeit zu sichern und um den charakteristischen Verformungsmerkmalen des heterogenen Stoffes Beton hinreichend gerecht zu werden. Aus diesen Aspekten ergibt sich eine kleinste Probekörperabmessung von mindestens 5 cm.

Die genannten Forderungen nach Anlehnung an Bauwerksgegebenheiten ist bei klimatischer Beanspruchung von besonderem Gewicht, weil durch thermische Unverträglichkeit der Betonkomponenten Grobzuschlag und Zementsteinmatrix hervorgerufene Mikrorißbildung in den Grenzflächen Einfluß auf das Betonkriechen und den Feuchtetransport ausüben kann.

- b) Die Krafteinleitung in die Probekörper erfolgt bei üblichen Prüfanlagen mit starren Lasteintragungsplatten. Infolge un-

gleicher Steifigkeit von Probekörper und Lasteintragungskonstruktion und durch Querverformungsbehinderung der Endquerschnitte infolge Reibung entsteht in den Endbereichen der Probekörper ein mehrachsiger Spannungszustand. Dadurch werden sowohl die in Kraftrichtung zu messenden Längsverformungen beeinflusst als auch möglicherweise die Entfaltung und Fortpflanzung von Mikrorissen behindert, die durch die Temperierung entstehen. Neben einem unmittelbaren Einfluß auf die Kriechverformung kann dies auch Bedeutung für Feuchtebewegungen haben und dadurch die Entwicklung des Kriechens beeinflussen.

Daher sollte die Probekörperform so gewählt werden, daß der Beobachtungsbereich der Verformungen frei von Verformungsbehinderungen ist. Rechnerische Untersuchungen /13/ und die Erfahrung haben gezeigt, daß dies dann der Fall ist, wenn der Probekörper eine Schlankheit $h/d \geq 3$ aufweist, und als Meßlänge $l \leq 2 d$ im mittleren Probenbereich gewählt wird.

- c) Thermisch aktivierte Feuchtebewegung in den Probekörpern soll während vertretbarer Versuchszeitabschnitte zu deutlichen Feuchteänderungen führen. Diese Forderung begrenzt die Probekörperabmessungen. Allerdings wachsen bei geringen Probekörperabmessungen die Probleme einer zentrischen Lasteintragung, und die Streuung der Meßwerte nimmt zu.

Üblicherweise werden für Untersuchungen bei Feuchteänderungen rotationssymmetrische Probekörper verwendet. Sie weisen in den Haupttransportrichtungen gleichlange Wege auf.

In Abb. 1 ist die Trocknung bei erhöhter Temperatur von Betonvollzylindern verschiedener Durchmesser aus /19/ und von Betonhohlzylindern mit einer Wandstärke von 5 cm (innere Mantelfläche versiegelt) dargestellt. Um z.B. eine Trocknung um ca. 80 % des Ausgangsgehalts an verdampfbarem Wasser innerhalb von 1000 h bei ca. 50 - 60 °C zu erhalten, darf der Zylinderradius bzw. die Wandstärke von Hohlzylindern demnach nicht größer als etwa 5 cm sein.

Unter Abwägung der drei Aspekte Größtkorndurchmesser des Zuschlags, Krafteinleitung und Feuchtetransport können Hohlzylinder als die geeignetste Probenform angesehen werden. Es bietet sich eine Wandstärke von 5 cm an, weil dann noch ein 16-mm-Größtkorn verwendet werden kann und außerdem ausreichend kurze Feuchtetransportwege zur Verfügung stehen. Um Feuchtetransport nur radial über die äußere Mantelfläche zuzulassen, ist die innere Mantelfläche ebenso zu versiegeln wie die beiden Stirnflächen. Eine Versiegelung der inneren Mantelfläche ist beispielsweise durch Verbleib des inneren Schalungsrohres im Probekörper denkbar.

2.2 Klimatisierung der Probekörper

Zur Beheizung von Proben bis unterhalb von ca. 100 °C sind zwei sich grundsätzlich unterscheidende Verfahren anwendbar:

- a) externe Beheizung: Beheizung der gesamten Kriechapparatur einschließlich Last- und Meßsystem.
- b) interne Beheizung: direkte Beheizung nur der Probekörper.

In Abb. 2 sind die beiden Klimatisierungsprinzipien in Schemadarstellungen gegenübergestellt.

Die externe Beheizung der gesamten Kriechapparatur bietet den Vorteil, daß Temperaturschwankungen und -gradienten leicht vermeidbar sind. Eine externe Beheizung ist realisierbar, indem komplette Kriecheinheiten in Prüfkammern oder Wasserbehältern klimatisiert werden. Derartige Kriecheinheiten bestehen aus Probekörper, Belastungseinrichtung und Verformungsmeßeinrichtung. Die Belastungseinrichtung ist in diesem Fall i.a. mechanisch, z.B. mit Hilfe von Federn oder Gewichten und Hebeln. Der Nachteil externer Beheizungssysteme ist vorrangig darin zu sehen, daß die Be- und Entlastung von Probekörpern im klimatisierten Zustand nur mit großem Aufwand realisierbar ist. Darüber hinaus ist die Verformungsmessung im Klimabereich schwierig.

Bei der internen Beheizung der Probekörper ist besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Temperaturgradienten zu richten. Dies ist erforderlich, weil die Wärmequellen lokal begrenzt sind. Üblicherweise werden zur Beheizung Heizstäbe oder -drähte rings um den Probekörper angeordnet, und nach außen wird eine Wärmedämmung angebracht. Denkbar ist auch die Beheizung direkt durch die Lasteinleitungsplatten, wie z.B. in /2/ erläutert wird.

Eine interne Beheizung ist besonders für solche Kriechuntersuchungen zu erwägen, in denen die Proben entweder "frei austrocknen" können oder aber in Gefäßen "versiegelt" werden. So findet in Kriechversuchsständen für deutlich höhere Temperatur als 100°C , z.B. in der Brandforschung, vorwiegend das interne Heizungsprinzip Verwendung, z.B. /4/. Abb. 3 zeigt einen in Braunschweig entwickelten Kriechprüfstand mit interner Wasserbeheizung für die Untersuchung des Kriechverhaltens von unter Wasser befindlichem Beton bei erhöhter Temperatur bis ca. 95°C /16/.

Für die Untersuchung des Kriechens versiegelten Betons wurden im Zuge der Reaktorforschung verschiedene versuchstechnische Lösungen, unter Verwendung des internen Heizungsprinzips, entwickelt, denen gemein die Verwendung eines Druckgefäßes ist. Eine besonders geschickte Konstruktion zur Verhinderung von Wasseraustritt aus den Proben stammt von /6/ und wurde in Serienprüfständen in München /18/ erfolgreich angewendet. Abb. 4 zeigt das Prüfprinzip nach /6/ und Abb. 5 dessen Münchner Realisierung. Der Probekörper wird mit einer Metallfolie versiegelt. Um deren Aufreißen zu verhindern, wird dem inneren Dampfdruck ein gleich großer äußerer entgegengesetzt, indem der Druckbehälter Wasser enthält. Die Beheizung erfolgt durch Heizdrähte außerhalb des Druckbehälters.

Sollen Proben definierten Luftfeuchten bei erhöhter Temperatur ausgesetzt werden, so ist eine interne Beheizung kaum geeignet. Dies ist nur in Prüfkammern möglich.

Zu den Aufgaben dieses Vorhabens gehört die Entwicklung einer Klimatisierungseinrichtung, die folgende Forderungen erfüllt:

- Die Proben sollen von Luft umgeben sein, deren Temperatur bis 95°C beträgt und die dabei beliebige relative Feuchten bis zur Sättigungsfeuchte aufweisen kann. Temperatur und Feuchte sollen in beliebigen Kombinationen einstell- und regelbar sein.
- Die Proben sollen auch im klimatisierten Zustand be- und entlastbar sein.

Diese Forderungen können weder durch eine ausschließlich externe noch interne Beheizung erfüllt werden. Geeignet ist hingegen eine Anlage, in der eine Klimaprüfkammer die Proben aufnimmt, die Lasteinrichtung sich jedoch außerhalb der Kammer befindet. Die Proben können dann mittels oben und unten durch die Kammer geführter Druckstempel belastet werden.

Besonderes Augenmerk ist auf die Messung und Regelung der Luftfeuchtigkeit zu richten. Bei hoher Temperatur und Feuchte versagen elektrische Verfahren zur Feuchtemessung. Von den klassischen Verfahren zur Messung der Luftfeuchtigkeit wie Taupunktspiegel, Psychrometer und Haarhygrometer ist in einer Prüfkammer nur das Aspirationspsychrometer verwendbar.

Da es diskontinuierlich mittels der Temperaturdifferenz zwischen einem feuchten und einem trockenen Thermometer arbeitet, ist es zwar für Kontrollmessungen einsetzbar, aber nur bedingt für Regelungsaufgaben geeignet.

So ist es vorteilhaft, keine Feuchteregelung vorzunehmen, sondern lediglich eine Steuerung durch ein sog. Taupunktbad. Das Prinzip der Erzeugung einer gewünschten Luftfeuchtigkeit mit Hilfe eines Taupunktbadetes wird in Abschnitt 3.3 ausführlich erläutert. Die tatsächliche Feuchtigkeit in einer Klimakammer kann mit einem Psychrometer gemessen werden und ggf. durch eine manuelle Anpassung der Taupunktbadtemperatur korrigiert werden.

2.3 Belastungs- und Lastkonstanthaltungseinrichtung

Aus der Definition des Kriechens - zeitabhängige Verformungen bei konstanter Spannung - folgt, daß ein wesentliches Element eines Kriechversuchsstandes eine Einrichtung für die Erzeugung und Konstanthaltung der kriechverursachenden Spannung sein muß. Die Spannungskonstanthaltung soll auch bei erhöhter und wechselnder Temperatur gewährleistet sein.

So sind an die Lasteinrichtung von Kriechständen für einaxiale Druckbeanspruchung und erhöhte Temperatur folgende Forderungen zu stellen /5, 7, 11/:

- Die Spannung im Probekörper muß trotz sich zeitabhängig verändernder Probekörpergeometrie innerhalb vorgegebender Fehler-schranken langfristig konstant bleiben. Ggf. muß eine Nachjustierung möglich sein.
- Die Druckspannung soll über dem Querschnitt konstant sein. Dies erfordert sehr steife Lasteinleitungsplatten. Dabei soll aber ein schwerer, ausladender Rahmen vermieden werden, da er schwierig zu handhaben und besonders bei Serienprüfständen platz- und kostenintensiv ist. Außerdem erschweren ausladende Querhäupter eine zentrische Lasteinleitung in die Probekörper.
- Die Kriechspannung muß rasch auf den Probekörper aufzubringen sein. Kriechverformungen werden i.allg. auf die überwiegend elastische Verformung beim Belastungsvorgang bezogen betrachtet. Der Übergang zwischen dieser elastischen Verformung, die zutreffender als spontane Verformung bezeichnet wird, und der anschließenden zeitabhängigen Verformung ist aber nicht eindeutig markiert, da sich innerhalb eines jeden Belastungsvorganges auch bereits inelastische Verformungsanteile entwickeln. Um den Betrag dieser nachträglich nicht zutreffend eliminierbaren Anteile gering zu halten, ist ein zügiger Belastungsvorgang anzustreben.

- Auch bei erhöhter und wechselnder Temperatur soll die Last, trotz unumgänglicher thermischer Dehnungen von Probekörpern und ggf. Prüfstandteilen, konstant bleiben.

Grundsätzlich sind für die Lasteinrichtung unterschiedliche Systeme möglich: mechanisch (Gewicht, Feder), hydraulisch, hydraulisch-mechanisch oder hydraulisch-pneumatisch /5, 11/.

Um mit Gewichten ausreichende Betondruckspannungen zu erzeugen, sind Hebel geeignet. Ein schematisches Beispiel für einen derartigen Prüfstand zeigt Abb. 6. Als Gewicht dient ein Wassertank. Ein derartiger Prüfstand ist auch für eine Verwendung bei erhöhter Temperatur geeignet. Die Probekörper müssen sich dann in einer klimatisierten Kammer befinden, die in Boden und Decke Durchführungen besitzt. Die Last kann zügig aufgebracht werden, ist zuverlässig konstant und temperaturunabhängig. Der Prüfstand ist aber sehr ausladend und platzaufwendig.

Der Prüfstand ist auch für Relaxationsversuche geeignet. Der konstante Dehnungszustand kann leicht mittels Lastverringern durch einen geregelten Wasserablaß erreicht werden.

Soll eine Kriechlast durch Federkraft erzeugt werden, sind Schraubenfedern oder Pakete aus mehreren Tellerfedern geeignet, die in gespannter Position gehalten werden. Da die Steifigkeit von Beton sehr viel größer als die der gewählten Feder ist, bleibt der Spannungsverlust infolge Kriechens oder Schwindens des Betons so gering, daß er näherungsweise vernachlässigt werden kann. Ansonsten kann durch zeitweiliges Nachspannen eine Rejustierung vorgenommen werden.

Abb. 7 zeigt schematisch einen Schraubenfeder-Kriechstand. Die Last wird durch Ausziehen der Kopfschrauben, also durch Spannen der Feder, aufgebracht.

Hier zeigt sich eine Schwäche federbelasteter Prüfstände: der Belastungsvorgang nimmt viel Zeit in Anspruch, in deren Verlauf bereits Kriechverformungen entstehen. Auch ist der Kraftaufwand zum Ausziehen der Schrauben bei großen Federkräften erheblich. Durch die Verwendung eines Hebelsystems, wie auf Abb. 8 gezeigt, und den Einsatz einer schwächeren Feder, kann der Belastungsvorgang erleichtert werden.

Um die Kraft, die in Federprüfständen für die Probekörper verfügbar ist, genau kennen und einhalten zu können, ist die Einrichtung zu kalibrieren. Im Versuch ist die vorhandene Kraft dann anhand der Federverformung unter Verwendung der zuvor ermittelten Kennlinie kontrollierbar. Die Beeinflussung der Federspannkraft durch Temperaturänderungen ist sehr gering.

Durch den Einsatz von Hydraulik kann der Belastungsvorgang wesentlich erleichtert und insbesondere verkürzt werden /9/. Um die Last aber mit einem Hydraulikzylinder konstant zu halten, sind aufwendige Maßnahmen erforderlich. Denn bereits geringe Leckagen und Betonverformungen führen zu deutlichen Druckverlusten. So muß der Öldruck entweder häufig manuell korrigiert werden oder aber eine aufwendige Regelung vorgesehen werden. Die Temperaturwechseleignung ist wegen der Proportionalität zwischen Temperatur und Druck bei konstantem Volumen, das hier zudem noch vergleichsweise gering ist, begrenzt.

Zu geeigneteren Lösungen, unter Verwendung hydraulischer Zylinder, gelangt man, wenn man Belastungs- und Lastkonstanthaltungseinrichtung voneinander trennt, z.B. durch hydraulische Belastung und mechanische oder pneumatische Konstanthaltung /4, 7/.

Das Prinzip einer hydraulisch-mechanischen Einrichtung zeigt Abb. 9. Während des Belastungsvorganges sind beide verschieblichen Lastplatten gelöst. Ist die Sollast, und damit auch die Sollverformung der Feder erreicht, wird die obere Lastplatte

durch Muttern fixiert und die Lastkonstanthaltung nunmehr der Feder zugewiesen. Der Hydraulikzylinder kann dann entfernt werden. Er steht also für die Belastung mehrerer Kriechprüfstände zur Verfügung und kann bedarfsweise für Lastkorrekturen eingesetzt werden. Eine derartige Lasteinrichtung verbindet die Vorteile von Federn hinsichtlich deren Temperaturunabhängigkeit mit denen der Hydraulik für zügiges und exaktes Belasten.

In hydraulisch-pneumatischen Systemen wird die Last hydraulisch gegen ein vergleichsweise großes Gasvolumen (z.B. Stickstoff) erzeugt, das dann Druckverluste abpuffern kann. Abb. 10 zeigt in einem Schemabild den grundsätzlichen Aufbau einer derartigen Anlage. In einem Druckspeicher sind durch eine Membran Öl und Gas voneinander getrennt. Ein Vorteil dieser Anlage ist die Möglichkeit der gleichzeitigen oder auch zeitversetzten Belastung mehrerer Versuchsstände mit der gleichen Kraft.

Ein besonderes Problem bei der Konzeptionierung eines Kriechstandes ist die Ableitung der aufgebrachten Druckkräfte. Üblicherweise geschieht dies in einem geschlossenen Prüfstand durch außenliegende Zugstangen und biegesteife Querhäupter, wie ja z.B. auch auf den Abb. 2 und 9 skizziert wurde. Sollen sich die Probekörper in einer klimatisierten Kammer befinden, die sonstigen Prüfstandteile aber außerhalb dieser Kammer (vgl. Abschnitt 2.2 "interne Beheizung"), so führt diese Lösung zu sehr ausladenden Querhäuptern, da sie ja die Prüfkammer überspannen müssen. Die Lösung erschwert eine zentrische Lasteinleitung und erfordert massige Konstruktionen. Abhilfe kann entweder die Wahl einer "externen Beheizung" oder die Verwendung einer zentral durch den Versuchsstand und die Probekörper (Hohlkörper) geführten Zugstange bieten.

2.4 Meßsystem für Betonverformungen

2.4.1 Auswahlkriterien

Zur Messung von Dehnungen und Verschiebungen auf der Betonoberfläche oder im Betoninneren ist eine Vielzahl von Verfahren und Geräten prinzipiell geeignet /17/. Aus der gestellten Meßaufgabe - Langzeitverformungen bei erhöhter, instationärer Temperatur - ergeben sich Auswahlkriterien für Meßverfahren, die die anwendbaren Verfahren eingrenzen:

- Zeitabhängiges Verhalten: Stabilität von Nullpunkt und Kennlinie.
- Meßkomfort: Quasi-gleichzeitige Abfrage vieler Meßstellen; Festlegung von Abfragezyklen; Automatische Meßwertregistrierung.
- Kennlinie: Eindeutiger, hysteresefreier Zusammenhang zwischen der aufgenommenen mechanischen Größe und dem registrierten Meßsignal; Eliminierbarkeit des Temperatureinflusses auf die Kennlinie; gute Auflösung.
- Kosten: Investitionskosten für die Meßanlage; Wiederverwendbarkeit; Haltbarkeit (mechanischer und thermischer Verschleiß).
- Handhabung: Einbau, Versuchsdurchführung und Ausbau ohne Beschädigung; Messen ohne Klimastörung.
- Klimastabilität: Widerstand gegen hohe Temperaturen und Feuchte von Aufnehmern und Anschlußteilen ohne Korrosion oder Versprödung.

Im folgenden werden die Funktionsweise und die Eignung einiger Meßwertaufnehmer zusammengestellt und bewertet.

2.4.2 Mechanische Aufnehmer

Die einfachsten Meßwertaufnehmer sind Meßbuhren. Sie sind die am häufigsten eingesetzten Verschiebungsmeßgeräte. Ihre Meßempfindlichkeit beträgt maximal 1/100 bis 1/1000 mm. Meßbuhren können entweder als federgeführte Taster am Probekörper befestigt werden oder als Setzdehnungsmesser Verwendung finden.

Das Messen mit dem Setzdehnungsmesser ist das klassische Verfahren der Dehnungsmessung an Betonoberflächen /1/. Gemessen wird die Längenänderung einer durch Meßmarken fixierten Meßstrecke, indem ein Gestell mit einem beweglichen und einem festen Fuß auf die Marken gesetzt wird. Die Veränderung des Abstandes der Meßmarken wird einem im Gestell befindlichen Aufnehmer über die Verschiebung oder Verdrehung der beweglichen Tastspitze mit oder ohne Übersetzung mitgeteilt. Der Aufnehmer ist i.allg. eine Meßuhr, jedoch sind auch optische oder elektrische Aufnehmer verwendbar.

Dadurch, daß ein Setzdehnungsmesser nur unmittelbar während der Messung auf das Meßobjekt aufgesetzt wird, entstehen einige Meßunsicherheiten und Anwendungsbeschränkungen, aber auch Vorteile.

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber fest am Probekörper installierten Meßwertaufnehmern ist durch die Bezugsmessung auf einer Eichstrecke (Invar-Stahl) vor jeder Messung am Probekörper gegeben. Unabhängig vom eigentlichen Aufnehmertyp ist dadurch eine hervorragende Langzeitstabilität gewährleistet. Da die Aufnehmer nicht langfristig einem extremen Klima ausgesetzt werden, ist die Gefahr von Korrosion oder Versprödung an Aufnehmerteilen gering.

Diesen Vorteilen steht aber eine Reihe gravierender Nachteile gegenüber:

- Sehr zeitaufwendiges, nicht automatisierbares Verfahren.
- Bei erhöhter Temperatur müssen die Meßmarken auf Hilfskonstruktionen aus dem klimatisierten Bereich herausgeführt werden, wodurch die Maßachse weit außerhalb der Probekörperachse liegt. Dies führt zu Unsicherheiten. Befinden sich die Meßmarken hingegen im klimatisierten Bereich, so ist keine Ablesung ohne Klimastörung möglich.
- Gefährdung des Meßpersonals beim Messen in Bruchnähe.
- Unsicherheiten durch Verschmutzung oder Korrosion der Meßmarken (Kugel) und der Tastspitzen (Kugelpfanne).
- Unsicherheiten durch das Aufsetzen infolge unterschiedlicher Krafteinwirkung durch das Meßpersonal, Lagerspiel in der mechanischen Übertragung vom beweglichen Taststift auf den Meßwert-aufnehmer.

Fest montierte Meßuhren sind für die gestellte Meßaufgabe nur dann einsetzbar, wenn sie an Hilfskonstruktionen installiert werden, die entweder aus dem klimatisierten Bereich herausragen oder an den außerhalb dieses Bereichs befindlichen Prüfstandhäuptern montiert sind. Die Klimatisierung müßte für eine derartige Anordnung des Meßsystems nach dem Prinzip "interne Beheizung" erfolgen.

Diese Anordnung des Meßsystems hat folgende Nachteile: Messen weit außerhalb der Probenachse; bei Montage an Prüfstandteilen werden auch deren Verformungen mitgemessen; die Meßuhren sind nicht vor Berührung geschützt.

Der Einsatz von Meßuhren im Klimabereich ("externe Beheizung") ist nicht empfehlenswert, da sie in feucht-warmem Klima nicht

korrosionsbeständig sind und die Ablesungen nur durch Öffnen der Klimakammer und somit bei Klimastörung möglich sind, oder Sichtfenster vorzusehen sind.

2.4.3 Dehnmeßstreifen

Die Funktion von Dehnmeßstreifen (DMS) beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstandes einer auf eine Trägerfolie aufgetragenen dünnen, metallischen Leiterbahn bei deren Verformung. Die Veränderung des elektrischen Widerstandes und daraus folgend der angelegten Spannung wird mit Hilfe einer Wheatstone-Brückenschaltung registriert, verstärkt und auf einem Voltmeter angezeigt. Die Spannungsänderung ist proportional zur Dehnung. Proportionalitätsfaktor ist der sog. k-Faktor, eine Materialkonstante des DMS.

Dehnmeßstreifen sind häufig eingesetzte Wandler zur Umsetzung einer Dehnung in ein elektrisches Meßsignal [1, 15]. Sie sind in vielfältigen Formen erhältlich, vergleichsweise preiswert und leicht zu handhaben. Darüber hinaus haben sie keine mechanisch beweglichen Teile, beanspruchen wenig Platz und verfügen über eine geringe Masse, so daß sie an jeder Stelle auf Betonproben applizierbar sind, ohne die Probenverformung zu beeinflussen. Sie ermöglichen hohen Meßkomfort durch häufige Abfrage und Automatisierung von Abfragezyklen in Vielstellenmeßanlagen.

Zur direkten Erfassung von Betondehnungen werden DMS i.d.R. auf die Betonoberfläche aufgeklebt. Es wird also nicht die Abstandänderung zweier Punkte auf dem oder im Probekörper gemessen, sondern bereits die Dehnung in bezogener Weise.

Bei der Verwendung von Dehnmeßstreifen auf Beton sind einige Besonderheiten zu beachten:

- Die DMS-Länge ist auf die Werkstoffstruktur des Betons abzustimmen. So ist, um die mittlere Betondehnung zuverlässig zu

messen, mindestens ein Verhältnis Meßlänge/Größtkorndurchmesser von ca. $3 \div 5$ erforderlich /10, 17/. Ansonsten können die Messungen durch örtliche Inhomogenitäten verfälscht werden.

- Der elektrische Widerstand ist temperaturabhängig. So ist bei sich verändernder Temperatur der Einsatz weiterer DMS auf unbelasteten Probekörpern in demselben Klimate zur Temperaturkompensation erforderlich.
- Die entscheidenden Probleme bei der Verwendung von DMS für Langzeitverformungsmessungen auf Beton, besonders bei erhöhter Temperatur und Feuchte, liegen in deren mangelnder Langzeitstabilität. Um sich zeitabhängig entwickelnde Betonverformungen wie Kriechen, Schwinden oder Quellen mit Dehnmeßstreifen erfassen zu können, müssen diese über den Meßzeitraum zuverlässige Werte liefern. Dies bedeutet, daß scheinbare Dehnungen der DMS aus Störeinflüssen entweder vermeidbar oder eliminierbar sein müssen. DMS neigen aber zu sog. Nullpunktdrift, die durch Veränderungen von Aufnehmereigenschaften zwischen den Meßwertabfragungen entsteht und folgende Ursachen haben kann:
 - Mängel in der Temperaturkompensation
 - Instabilität im nachgeordneten Meßsystem (Meßbrücke, Speisung, Verstärkung) z.B. durch Kontaktkorrosion in Anschlüssen und Schaltungen
 - Fehler in der DMS-Aufklebung auf die Betonoberfläche
 - Kriechen des DMS-Trägermaterials oder des Klebers oder Relaxation des Widerstandsdrahtes
 - Kriechströme als Nebenschluß infolge von Mängeln in der elektrischen Isolation
 - Quellen der Kunststoffteile einer DMS-Meßstelle durch Feuchtigkeitsaufnahme bei ungenügender oder fehlerhafter Feuchtigkeitskapselung.

Insbesondere die drei letztgenannten Driftursachen haben dazu geführt, daß DMS für die Messung von Langzeitverformungen nur selten eingesetzt werden /3/. Da diese Probleme in feucht-warmem Klima noch zunehmende Bedeutung erlangen, ist die Verwendung von DMS für die hier gestellte Meßaufgabe nicht empfehlenswert.

2.4.4 Induktive Aufnehmer

Bei induktiven Aufnehmern ruft die zu messende Verformung im magnetischen Feld einer Spule mit Wechselstrom eine zu ihr proportionale Impedanzänderung hervor. Von der Impedanz können sowohl die Induktivität als auch der magnetische Widerstand als Meßgröße genutzt werden. Meistens werden induktive Tauchankersysteme verwendet, die aus zwei, auf gemeinsamer Achse hintereinander angeordneten Zylinderspulen bestehen, deren Induktivität durch axiales Verschieben eines gemeinsamen, ferromagnetischen Spulenkerns gegensinnig verändert wird. Die Ausgangsspannung ist direkt proportional zur Verschiebung des Kerns. Das Prinzip der Wegmessung auf einer Betonoberfläche mit einem induktiven Tauchankeraufnehmer ist auf Abb. 11 dargestellt.

Da die Induktivität einer Spule nur von Größen bestimmt wird, die in erster Näherung temperaturinvariant sind, arbeiten induktive Aufnehmer weitgehend temperaturunbeeinflusst. Allerdings ist bei während der Meßdauer veränderlicher Temperatur die thermische Eigendehnung der Übertragungsmechanik, wie Halterungen und Meßgestänge zu beachten. Diese kann aber bei geeigneter Auslegung gering und hysteresefrei gehalten werden.

Weitere Vorzüge induktiver Aufnehmer sind deren hohe Meßempfindlichkeit und recht exakt ($\pm 0,5 \%$) lineare Kennlinie. Zudem sind sie bei geeigneter Kapselung der Spulenbereiche feuchteunempfindlich und daher sehr langzeitstabil.

Zur Erfassung und Verstärkung der Meßsignale von induktiven Aufnehmern können übliche 5-kHz-Trägerfrequenz-Meßverstärker verwen-

det werden. Wird eine Meßstellenumschaltanlage zum Anschluß mehrerer Aufnehmer an einen Verstärker eingesetzt, so ist einer mit Relais arbeitenden Anlage eine solche vorzuziehen, die die Meßstellen mit Halbleitern ausschaltet. Diese arbeiten verschleißfrei und gewährleisten eine hohe Langzeitstabilität des Nullpunktes.

Ein wesentlicher Nachteil induktiver Aufnehmer ist deren vergleichsweise teure Anschaffung. Da die Aufnehmer aber beliebig oft wiederverwendbar sind, sind ihre Kosten über die Nutzungsdauer eines Prüfstandes z.B. mit nur einmal verwendbaren DMS zu vergleichen und können dann für Serienprüfstände durchaus auch wirtschaftlich vorteilhaft sein.

Ein anderer Nachteil ist die hohe Berührungsempfindlichkeit am Probekörper installierter Aufnehmer. Dieser Aspekt ist für Langzeitmessungen sehr wichtig. Im Falle eines "externen Klimatisierungssystems" sind sie vor Berührung und Stoß geschützt, da sie sich innerhalb der Klimakammer befinden.

2.4.5 Andere Aufnehmertypen

Neben den vorgestellten, häufig verwendeten Verfahren zur Messung von Wegänderungen oder Dehnungen des Betons gibt es eine Reihe weiterer Verfahren, die auf mechanischer, elektrischer, optischer oder einer Kombinationsbasis arbeiten und für die Messung von Langzeitverformungen bei erhöhter Temperatur in Betracht gezogen werden können. Es sollen hier kurz die Meßprinzipien von Schwingsaitengebern sowie von fluidischen Aufnehmern angesprochen werden, die beide als besonders robust gelten.

Schwingsaitengeber bedienen sich der Tatsache, daß zwischen der Eigenfrequenz einer zum Schwingen angeregten, gespannten Saite und ihrem Spannungs- bzw. Dehnungszustand ein eindeutiger Zusammenhang besteht. Die im Magnetfeld eines Elektromagneten schwingende Saite induziert in der Magnetspule eine elektrische Schwin-

gung gleicher Frequenz, das eigentliche Meßsignal. Da die Frequenzänderung der Saite von Faktoren wie Temperatur und Feuchtigkeit unabhängig ist, ist die Reproduzierbarkeit der Meßwerte auch unter rauen Bedingungen und über lange Zeit gewährleistet. Dazu ist aber beim Aufnehmerbau besondere Sorgfalt zur Vermeidung von Saitenschlupf in den Verankerungen und von Relaxation und Korrosion der Saiten erforderlich.

Schwingsaitengeber wurden bisher vorrangig in den USA für die Messung von Kriechdehnungen eingesetzt /11, 12/. Sie können sowohl für Messungen auf der Betonoberfläche als auch im Betoninneren verwendet werden. Besonders im einbetonierten Zustand ist aber ihre große Masse und hohe Eigensteifigkeit hinsichtlich ihrer Rückwirkungen auf die Betonverformung zu berücksichtigen (s. Abschnitt 2.4.6).

Fluidische Verfahren arbeiten mit Luft oder Inertgasen als Signalmedium. Üblicherweise wird durch die Betonverformung eine konische Nadel in einer Düse bewegt, wodurch sich der Massenfluß ändert. Eine zweite Düse mit festem Querschnitt dient zur Störgrößenkompensation. In einer sog. Kompensationseinrichtung wird der Nadelweg in ein elektrisches Ausgangssignal umgeformt, das der Verformung proportional ist. Derartige Aufnehmer sind sehr robust und für den Einsatz bei hoher Temperatur geeignet. Fluidische Meßverfahren sind aber noch wenig verbreitet, da ihr Einsatz mehr Probleme bereitet, als der von elektrischen Gebern. Fertige Geräte sind nämlich im Handel kaum erhältlich, so daß vom Anwender noch hoher Aufwand für Entwicklung, Herstellung und Erprobung der Gesamtanlage geleistet werden muß. Dies verursacht noch Kosten, die deutlich über jenen der anderen vorgestellten Verfahren liegen.

2.4.6 Verformungsmessung im Betoninneren

Die vorgestellten Verfahren zur Messung der Betonverformungen behandelten in erster Linie die Messung auf der Betonoberfläche.

Mit Ausnahme der mechanischen Verfahren Meßuhr und Setzdehnungsmesser sind aber alle so modifizierbar bzw. ausrüstbar, daß sie im einbetonierten Zustand verwendet werden können.

Die Messung auf der Betonoberfläche ist die übliche und einfachere Vorgehensweise, denn sowohl die Installation ist problemloser als auch die Kontrolle, Korrektur oder Reparatur des Meßsystems. Dem Nachteil der Oberflächenmessungen, daß nämlich der "Oberflächenbeton" in seinen Eigenschaften und in seinem Gefüge nicht repräsentativ ist, stehen gravierende Probleme bei der Messung im Beton entgegen. So muß der Aufnehmer der erheblichen mechanischen Beanspruchung beim Betoniertvorgang widerstehen können und vor der Betonage in der Schalung justierbar und fixierbar sein.

Vorrangiges Problem beim Messen im Beton ist aber die Rückwirkung des Aufnehmers auf den Meßwert. Denn jedes Meßelement ist ein Fremdkörper, der das Gefüge und den Beanspruchungszustand örtlich stört; es sei denn, er hat das gleiche Verformungsverhalten wie der Beton. Dies ist aber, da Meßwertaufnehmer i.d.R. metallisch sind, sowohl hinsichtlich des Elastizitätsmoduls und deren zeitlicher Änderungen beim Beton, als auch für das Temperaturdehnverhalten und das rheologische Verhalten nicht der Fall.

In der Literatur wurden mehrere Ansätze gemacht, den Einfluß von E-Modulunterschieden auf die Meßwerte rechnerisch zu überprüfen. /17/ enthält eine Zusammenfassung dieser Ansätze.

Bei der Beobachtung zeitabhängiger Verformungen sind Differenzen der Temperaturdehnkoeffizienten und im rheologischen Verhalten besonders entscheidend. Denn jede Veränderung der Temperatur gegenüber dem Einbauzustand erzeugt Spannungen in Beton und Aufnehmer.

Metallische Meßwertaufnehmer haben meistens eine annähernd linear-elastische Kennlinie, während sich Beton ja ausgeprägt visko-elastisch-plastisch verhält. So nimmt mit der Belastungszeit die Differenz der Dehnungen von Beton und Aufnehmer zu. Da der E-Modul des Aufnehmers häufig größer als der des Betons ist, täuscht der Meßwertaufnehmer dann zu geringe Kriechverformungen des Betons vor.

3. Zur Ausführung der Prüfeinrichtung

3.1 Probekörper

Auf der Grundlage der Überlegungen in Abschnitt 2.1 werden Hohlzylinder mit folgenden Abmessungen als geeignete Probekörperart gewählt: $d_a = 15 \text{ cm}$, $d_i = 5 \text{ cm}$, $h = 60 \text{ cm}$. Für den zu entwickelnden Prüfstand weisen sie folgende Vorzüge auf:

- Die Lastableitung kann mit einer Zugstange durch die zentrale Öffnung erfolgen. Dadurch läßt sich die Konstruktion ausladender Querhäupter vermeiden.
- Bei einer Wandstärke von 5 cm kann üblicher Konstruktionsbeton (Größtkorn- $\emptyset = 16 \text{ mm}$) verarbeitet werden. Auch ist diese Abmessung ausreichend klein, um im Experiment deutliche Feuchteänderungen zu bewirken.
- Trotz der geringen Wanddicke von 5 cm ist die Aufstandsfläche der Probekörper so groß, daß eine annähernd zentrische Lasteinleitung bei vertretbarem Aufwand realisierbar ist.
- Die Höhe von 60 cm erlaubt Verformungsmessungen auf einer ausreichend langen Meßbasis von 30 cm, ohne in die querdehnungsbehinderten Krafteinleitungsbereiche zu gelangen.

Als Außen- und Innenschalungen können handelsübliche Kunststoffrohre aus PVC, PE oder PP dienen. Bei der Verwendung von PVC ist dessen begrenzte Eignung für erhöhte Temperatur zu beachten. Es gelten etwa folgende maximale Gebrauchstemperaturen: PVC 60°C , PE 100°C , PP 130°C . Im vorliegenden Vorhaben werden PP-Rohre eingesetzt. Die Schalungsrohre werden als Einwegschalung verwendet. Das innere Rohr bleibt als verlorene Schalung im Probekörper. Dadurch kann später im Versuch eine Feuchteaufnahme und -abgabe nur über die äußere Mantelfläche erfolgen. Es empfiehlt sich, die äußere Schalung nicht in Form von zwei Zylinderhalbschalen herzustellen, sondern das unversehrte Rohr zu verwenden.

Denn die thermoplastischen Kunststoffrohre stehen, verursacht durch die Herstellung, unter erheblichen Eigenspannungen. Dadurch sind sie nach dem Aufschneiden nicht wieder in Kreisform zusammenzufügen.

Durch die Verwendung des geschlossenen Rohres ist dessen Wiederverwendung ausgeschlossen, da es beim Ausschalen zerstört wird. Dies ist kostenmäßig vertretbar ($\sim 12 \text{ DM}/60\text{cm}$), da andererseits der Aufwand für Schalungssäuberung und -vorbereitung entfällt. Außerdem können die Probekörper, an Fuß- und Kopfende mit Folie versehen, in den Rohren unter idealen Feuchtebedingungen erhärten und erst zu einem beliebigen, gewünschten Zeitpunkt entschalt werden. Vor dem Einbau in den Kriechversuchsstand werden die Stirnflächen planparallel geschnitten und geschliffen.

Die Kopf- und Fußausbildung der Hohlzylinderschalungen wird aus Stahldrehteilen erstellt. Abb. 12 zeigt die Konstruktion für die Abmessungen der für die Probenherstellung in diesem Forschungsvorhaben verwendeten Kunststoffrohre aus PP (außen: $159 \times 4,5$; innen: $50 \times 4,6$). Vier äußere Zugstangen verbinden die Kopf- und Fußkonstruktion und fixieren die Rohre. Abb. 13 zeigt eine montierte Schalung.

Zur Verminderung der Wandreibung beim Betonieren sollten die Schalungsflächen geölt werden. Die Verdichtung erfolgt lagenweise auf dem Rütteltisch.

Da das innere Kunststoffrohr während des gesamten Versuchsablaufs im Probekörper bleibt, wird es im Kriechversuch an der Kraftaufnahme beteiligt. Die folgende Betrachtung zeigt aber, daß diese Beteiligung vernachlässigbar gering ist:

$$E_b \cong 30.000 \text{ N/mm}^2$$

$$A_b = (150^2 - 50^2) \cdot \pi \cdot 0,25 \\ = 15,71 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$E_{pp} \cong 1.400 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{pp} = (50^2 - 41^2) \cdot \pi \cdot 0,25 \\ = 0,64 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_k = 15 \text{ N/mm}^2$$

$$\epsilon_b = 15/30.000 = 0,5 \text{ ‰}$$

$$\begin{aligned} F_b &= 15 \cdot 15,71 \cdot 10^3 \\ &= 235,6 \text{ kN} \\ &= \text{Prüfkraft} \end{aligned}$$

$$\sigma_{pp} = \frac{0,5}{1000} \cdot 1.400 = 0,7 \text{ N/mm}^2$$

$$F_{pp} = 0,7 \cdot 0,64 \cdot 10^3 = 0,45 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow \underline{F_{pp} \hat{=} 0,19 \% \text{ von } F_b}$$

Somit entspricht der Anteil des inneren Kunststoffrohres an der Kraftaufnahme des Betons unter der Voraussetzung linear-elastischen Werkstoffverhaltens nur etwa 0,2 %, mit abnehmender Tendenz bei erhöhter Temperatur wegen der E-Modulverringerung des Kunststoffs. Der E-Modul von PP fällt bei 80 °C auf etwa 20 % des Wertes bei 20 °C ab.

Um Veränderungen der Feuchtigkeit von Probekörpern im Versuch registrieren zu können, werden Hohlzylinder in ca. 5 cm dicke Ringscheiben geschnitten und in derselben Lage wieder zusammengefügt. Zwischen die einzelnen Scheiben werden ca. 2 mm dicke Folien gelegt, so daß die Scheiben untereinander keine Feuchtigkeit austauschen können und an den Schnittflächen auch keine Trocknung erfolgen kann. Ein derartiges Scheibenpaket wird durch eine zentrale Zugstange fixiert. Abb. 14 zeigt ein Scheibenpaket in schematischer Darstellung.

Diese Scheibenpakete werden, zusammen mit den Probekörpern, für Kriech- bzw. Schwinduntersuchungen lastfrei mitklimatisiert. Durch die Entnahme von Scheiben, deren anschließende Wägung, Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz und abermalige Wägung kann die bezogene, mittlere Probenfeuchte \bar{U} folgenderweise ermittelt und in Abhängigkeit von der Versuchsdauer dargestellt werden:

$$\bar{U} = \frac{G_f - G_t}{G_t} \cdot 100 \text{ [M.-%]}$$

mit: G_f = Gewicht der Scheibe im feuchten Zustand bei Entnahme

G_t = Gewicht der Scheibe nach Trocknung bei 105 °C

3.2 Prüfstand und Lasteinrichtung

Für den Prüfstand wurde eine Anordnung gewählt, wie sie in Abb. 15 dargestellt ist. Die über zwei Druckstempel in den hohlzylindrischen Probekörper eingeleitete Druckkraft wird durch eine zentrale Zugstange aufgenommen. Im klimatisierten Prüfraum befindet sich lediglich der Probekörper; die Druckstempel sind durch Durchführungen in Kammerboden und -decke eingelassen. Der Hohlkolbenzylinder zur Belastung und die Tellerfedern zur Lastkonstanthaltung sind außerhalb des Prüfraumes. Das Prüfstandkonzept folgt also weder streng dem "externen" noch dem "internen" Klimatisierungsprinzip, denn das Wegmeßsystem befindet sich ebenfalls im Prüfraum. Über die Klimatisierungseinrichtung und das Wegmeßsystem wird in späteren Abschnitten berichtet; hier werden die Prüfstandkonstruktion und die Lasteinrichtung behandelt.

Der wesentliche Vorteil der gewählten Konstruktion liegt darin, daß eine zentrische Lasteintragung in diesem "zentrierten" System leichter möglich ist, als in einem Rahmen, der außen um die Prüfkammer herumführen und deshalb sehr ausladend und steif ausgebildet sein müßte. Darüber hinaus beansprucht der Prüfstand, dank der kompakten Bauweise, wenig Platz, allerdings eine Raumhöhe von ca. 5 m, da die Zugstange von oben eingeführt werden muß. Weiterhin ist die gewählte Konstruktion insbesondere zur Aufrechterhaltung einer konstanten Spannung auch bei veränderlicher Temperatur geeignet. Denn die innenbefindliche Zugstange erfährt die gleichen Temperaturänderungen wie der Probekörper. Da nun die Temperaturdehnkoeffizienten von Stahl und Beton ähnlich sind, entsteht keine wesentliche Relativverschiebung zwischen der Zugstange und dem Probekörper, die zu Änderungen der Federspannung führen würde. In Erprobungsversuchen konnte bei Aufheizungen und Abkühlungen zwischen 20 °C und 95 °C keine Änderung des zuvor eingestellten Federweges festgestellt werden.

Nun im einzelnen zur Konstruktion des Prüfstandes, der aus zwei hintereinander stehenden Prüfsäulen in einem Prüfraum besteht.

Die beiden Prüfsäulen ruhen auf einem Auflagerbock, der aus einer auf zwei U-Profilen liegenden Stahlplatte besteht. Die Belastung wird mittels eines hydraulischen Hohlkolbenzylinders aufgebracht und an einer Kraftmeßdose kontrolliert. Abb. 16 zeigt eine Prüfsäule mit aufgesetzter Belastungseinrichtung.

Bei der Belastung wird ein unter dem Auflagerbock hängendes Paket aus 10 Tellerfedern (200 x 112 x 14) gespannt. Das Tellerfederpaket ist auf Abb. 17 dargestellt. Da die Tellerfedern über eine fast ideal lineare Kennlinie verfügen, kann die Kraft auch mittels Meßuhren über den Federweg kontrolliert werden. Dank der doppelten Kontrolle kann ein evtl. Kraftverlust durch Reibung der Zugstange aufgespürt werden. Im sorgfältig zentrierten Prüfstand traf dies jedoch nie zu. Abb. 18 zeigt die gute Übereinstimmung zwischen der Federkennlinie der Tellerfedern nach Herstellerangaben und den Werten, die in einem Belastungsversuch an der Kraftmeßdose und an den Meßuhren der Tellerfedern abgelesen wurden.

Nach dem Erreichen der Prüflast wird die im Lastbock zugängliche obere Ankermutter gegen die Lastplatte angezogen. Das unter der Ankermutter befindliche teflonbeschichtete Axial-Gelenklager (Kalotte) dient zur Zentrierung. Nach dem Anziehen der Ankermutter wird der Hohlkolbenzylinder entlastet. Dann kann er gemeinsam mit dem Lastbock und der durch eine Koppelmuffe angeschlossenen oberen Spannstanze demontiert werden. Diese Teile können dann zur Belastung weiterer Prüfsäulen verwendet werden und müssen auch beim späteren Entlastungsvorgang zur Entspannung der Ankermutter dienen. Abb. 19 zeigt einen belasteten Prüfstand, die Belastungseinrichtung ist demontiert.

Im Prüfraum werden Temperaturen bis 95 °C bei gleichzeitiger hoher Luftfeuchte erzeugt. Deshalb besteht die Gefahr, daß es an Teilen wie den Druckstempeln, die in den Prüfraum hineinragen, zu Taupunktunterschreitung und somit zu Kondensatbildung kommt. Um

dieser Gefahr entgegenzuwirken, werden die Durchführungen im Prüfraumboden und in der Decke beheizt. Außerdem sind die Druckstempel sehr lang ausgebildet und auf einer Länge von ca. 50 cm mit einer Wärmedämmung ummantelt. So können steile Temperaturgradienten in den Druckstempeln vermieden werden. Der Wärmeabfluß aus den Druckstempeln in weitere Prüfstandteile wird durch wenig wärmeleitende Einlagen aus hochfestem, mineralischem Material (Glimmer) gering gehalten.

Die Druckstempel sowie die Lastplatten im Prüfraum sind aus Cr-Ni-Stahl, alle übrigen, nicht korrosionsgefährdeten Stahlteile bestehen aus Baustahl St 37.

Im Anhang befinden sich eine Stückliste und maßstäbliche Konstruktionszeichnungen für alle Teile des Prüfstandes und der Lasteinrichtung. Die Dimensionierung der Bauteile läßt Druckkräfte bis 500 kN zu. Mit der angegebenen Tellerfederbestückung ist der Prüfstand bis ca. 340 kN ausnutzbar.

Die Verformungsmessungen auf den Betonhohlzylindern bei den Kriechversuchen erfolgen mit jeweils drei induktiven Wegaufnehmern, die auf den Umfang verteilt sind. Trotz der Verwendung von Zentrierhilfen (Markierungen, Einlassungen, Axial-Gelenklager), und trotz sorgfältigen Einbaus der Probekörper sind Belastungsexzentrizitäten unvermeidbar, die sich in Anzeigendifferenzen zwischen den drei Wegaufnehmern äußern. Verantwortlich für diese Dehnungsdifferenzen werden neben Einbauausmittigkeiten stoffliche Inhomogenität sowie geometrische Fehlerhaftigkeit der Probekörper sein. Letzteres betrifft insbesondere Abweichungen der geschnittenen und geschliffenen Stirnflächen von der Parallelität und außerdem nicht exakte Orthogonalität zwischen den Stirnflächen und der Zylinderachse.

In 10 Belastungsprobeversuchen wurden die Exzentrizitäten ermittelt. Zu diesem Zweck wurden Probekörper mit Sorgfalt eingebaut

und zügig mit ca. 30 % ihrer Druckfestigkeit belastet. Unmittelbar anschließend wurden die 3 Dehnungswerte abgelesen. Bezieht man den größten bzw. kleinsten gemessenen Randdehnungswert auf die mittlere Dehnung, so erhält man im Mittel über die 10 Versuche einen Unterschied von 8,5 %. Der minimale Unterschied beträgt 2,9 %, der maximale 17,0 %. Da das Kriechen üblicherweise in einem Bereich der Belastungsgrade untersucht wird, in dem zwischen den Kriechverformungen und dem Belastungsgrad näherungsweise Proportionalität herrscht ($\sigma_k \leq 0,5 \cdot \beta_c$), bleiben die festgestellten Dehnungsdifferenzen praktisch ohne Auswirkung auf die Kriechzahl $\varphi = \epsilon_k / \epsilon_{el}$.

Durch das Betonkriechen erfahren die Tellerfedern einen mit der Belastungsdauer zunehmenden Spannungsverlust. Der Zuwachs an Spannungsverlust ist zu Beginn der Belastungszeit am größten, da dann die Kriechgeschwindigkeit ihren Maximalwert aufweist. Die Entwicklung und das Ausmaß der Federentspannung ist anhand folgender Betrachtung abschätzbar:

Tellerfedern: $F_{\max} = 339 \text{ kN}$ bei Zusammendrückung $s = 35 \text{ mm}$

Beton: (angenommene Kennwerte)
 $\beta_c = 45 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_k = 1/3 \cdot \beta_c = 15 \text{ N/mm}^2$
Hohlzylinder $d_a = 150 \text{ mm}$, $d_i = 50 \text{ mm}$, $l = 600 \text{ mm}$:
 $A_b = 15.708 \text{ mm}^2$
 $F_{b,k} = 15 \cdot 15.708 \cdot 10^3 = 236 \text{ kN}$; $E_b = 35.000 \text{ N/mm}^2$

Die elastische Betonstauchung bei Belastung beträgt:

$$\epsilon_{el} = 15/35.000 = 4,29 \cdot 10^{-4} \text{ [-]}$$
$$\Delta l_{el} = 600 \cdot 4,29 \cdot 10^{-4} = 0,26 \text{ mm}$$

Die Verkürzung des Probekörpers infolge Kriechens Δl_k ist proportional zur gemessenen Kriechzahl φ :

$$\Delta l_k = \varphi \cdot \Delta l_{el}$$

Der Kraftverlust der Tellerfedern beträgt dann:

$$\Delta F = \Delta l_k \cdot \frac{F_{\max}}{s} = \varphi \cdot 2,52 \text{ [kN]},$$

bzw. bezogen auf die Betonkriechkraft bei Belastung:

$$\frac{\Delta F}{F_{b,k}} = \varphi \cdot 10,67 \cdot 10^{-3} \cdot 100 [\%] = \underline{\underline{\varphi \cdot 1,067 [\%]}}$$

Auf Abb. 20 ist die Kriechzahl φ in Abhängigkeit von der Belastungszeit für einen Erprobungskriechversuch bei 90 °C/65 % r.F. dargestellt. Für den untersuchten Beton gelten etwa die o.a. Kennwerte. Außerdem zeigt die Abbildung die Entwicklung des auf die Kriechkraft bezogenen Federkraftverlustes. Durch Nachspannen des Tellerfederpakets in der Anfangsphase der Belastungszeit bzw. durch anfängliche leichte Überspannung der Federn kann die Abweichung von der Kraftkonstanz verringert werden.

3.3 Klimatisierungseinrichtung

Die Klimatisierungseinrichtung wurde gemeinsam mit Fa. Weiss Technik, Reiskirchen, entwickelt und von Fa. Weiss hergestellt. Sie besteht i.w. aus zwei Teilen, nämlich einem Prüfraum und einem separaten, mit dem Prüfraum durch flexible, wärmedämmte Leitungen verbundenen Klimatisierungsaggregat. Durch die Trennung der Bestandteile ist die Möglichkeit gegeben, den Prüfraum so gestalten zu können, daß er Durchführungen an den gewünschten Stellen erhält und in Prüfstände einbaubar ist.

Der für den Kriechprüfstand entwickelte Prüfraum hat die Innenabmessungen H/B/T = 970/780/980 mm, in Boden und Decke je zwei hintereinanderliegende, beheizte Durchführungen mit 150 mm Durchmesser, sowie links und rechts in den Kammerwänden Durchführungen aus thermisch schlecht leitendem Material mit 50 mm Durchmesser. Diese Durchführungen dienen der Einführung von Meßleitungen bzw. dem Einbau eines Aspirations-Psychrometers zur manuellen Kontrolle der Prüfraumfeuchtigkeit. Der Prüfraum besteht aus dicht verschweißtem Edelstahlblech. Der 10 cm dicke Zwischenraum zwi-

schen Außengehäuse und Prüfraumbehälter ist zur Wärmedämmung mit Polyurethan ausgeschäumt. An der Prüfraumrückwand befindet sich hinter einem Luftleitblech ein Wärmetauscher, außerdem sind hier ein Ventilator und Widerstandsthermometer Pt 100 zur Lufttemperaturregelung montiert. Der Prüfraum ist von vorn durch eine doppelt gedichtete und gedämmte Tür zugänglich. Abb. 21 zeigt einen Blick in den Prüfraum mit montierten, noch nicht gedämmten unteren Druckstempeln. Das Volumen des Prüfraums ist ausreichend, um neben den Kriechproben weitere Proben zur Beobachtung von thermischen und Schwinddehnungen, sowie von Feuchteänderungen lastfrei einzulagern.

Das separate Klimatisierungsaggregat kann im Prüfraum Lufttemperaturen zwischen 15 und 95 °C durch indirekte Temperierung mit Sole erzeugen. Die Be- und Entfeuchtungsanlage arbeitet nach dem Verdunstungsprinzip und besteht aus einem Wasserbad, das im Bereich von 15 bis 95 °C Taupunkttemperatur Luftfeuchtigkeiten zwischen 10 und 95 % erzeugen kann. Die Regelungen können eine Temperaturkonstanz von ± 1 °C und eine Feuchtekonstanz von ± 3 % r.F. erreichen.

Die Prüfraumtemperierung mit Sole erfolgt, indem ein Antifrogen-Wassergemisch in einem Badthermostaten im Klimaaggregat auf die gewünschte Temperatur eingestellt und anschließend durch den Wärmetauscher im Prüfraum gepumpt wird. Zur Temperierung der Sole im Thermostaten dienen eine elektrische Tauchheizung sowie die eingebauten Verdampferschlangen einer luftgekühlten Kältemaschine. Die Bei- und Entfeuchtung der Prüfraumlufte erfolgt durch die kontinuierliche Zufuhr einer Frischluftmenge, wobei die Luft vor Eintritt in den Klimaschrank den gewünschten Feuchtwert erhält. Dazu wird die über einen Luftfilter von einer Luftpumpe angesaugte Frischluft von unten in einen Behälter mit entsprechend temperiertem Wasser (Befeuchterbad) gedrückt. Die Luft wird dabei in feine Bläschen zerteilt und nimmt auf ihrem Weg zur Wasseroberfläche die Wassertemperatur an. Durch die feine Zerteilung sättigt sich die Luft mit Wasserdampf. Das Befeuchterbad ist da-

bei so temperiert, daß es der Taupunkttemperatur entspricht, die zur gewünschten relativen Feuchte der Prüfraumlufte bei der gewählten Lufttemperatur gehört. Die in den Prüfraum weitergeleitete, dampfgesättigte Luft wird dort auf die Prüfraumtemperatur aufgeheizt, so daß sich die gewünschte relative Luftfeuchtigkeit automatisch einstellt. Die Befeuchterbadtemperierung erfolgt durch eine elektrische Tauchheizung und durch Verdampferschlangen der Kältemaschine.

Mittels eines digitalen Zeit-Programmgebers können beliebige Temperatur-Feuchte-Programme mit linearen Temperatur- und Feuchteänderungen ($\dot{T} = \text{const.}$; $\dot{T} = \text{const.}$) vorgegeben werden.

Auf Abb. 22 ist in einer Prinzipskizze die Funktionsweise der Klimatisierungseinrichtung dargestellt. Abb. 23 zeigt das Befeuchterbad, das Solebad mit aufgeflosschter Pumpe und die Kältemaschine. Auf Abb. 24 ist der Kühler der Kältemaschine und das Schwimmer-Nachlaufgefäß für das Befeuchterbad dargestellt. Abb. 25 zeigt die digitalen Sollwertgeber für Temperatur und Taupunkttemperatur auf der Frontplatte des Klimaaggregates. Auf dem Aggregat stehen der Zeit-Programmgeber und die Anlage für die Verstärkung und Registrierung von Dehnungen und Temperaturen. Der Vorteil des erläuterten Feuchtesystems gegenüber einem solchen, in dem ein zerstäubtes Wasser-Luftgemenge in den Prüfraum geblasen wird und zur Regelung die Luftfeuchte gemessen werden muß, liegt darin, daß die Feuchteeinstellung exakter ist, weil keine Wassertröpfchenbildung auftritt und auf eine per se ungenaue Feuchtemessung zur Regelung verzichtet werden kann.

Da das Prüfraumklima geregelt wird und nicht die Probekörpertemperatur, ist die Geschwindigkeit von Temperaturänderungen so in Abhängigkeit von der Probekörpergröße zu wählen, daß die Eigenspannungen im Probekörper infolge eines Temperaturgradienten über den Querschnitt gering bleiben. Deshalb wurden Probeversuche für verschiedene Aufheizgeschwindigkeiten durchgeführt. Es wurden die gewählten Betonhohlzylinder ($d_a = 15 \text{ cm}$, $d_i = 5 \text{ cm}$) verwendet.

Die Temperatur der Probekörper wurde mit jeweils einem Fe-Konstantan-Thermoelement auf der Betonoberfläche und auf dem inneren Schalungsrohr gemessen. Abb. 26 zeigt die Aufheizverzögerung eines Hohlzylinders gegenüber dem Prüfraum für eine Heizgeschwindigkeit von $\dot{T} = 5 \text{ K/h}$. Ausgenommen Ein- und Ausschwenkzeiten folgt der Probekörper der Prüfraumaufheizgeschwindigkeit. Die maximale Temperaturdifferenz über die Wanddicke beträgt etwa 3°C , im Hinblick auf Temperatureigenstressungen vernachlässigbar.

3.4 Meßsystem

Die Verformungsmessung soll direkt auf den Probekörpern erfolgen und nicht außerhalb des Prüfraums an den Druckstempeln, da hier Verformungen der Anschlußteile miterfaßt würden. Deshalb fiel, unter Berücksichtigung der Betrachtungen in Abschnitt 2.4, die Wahl auf induktive Wegaufnehmer, die den klimatischen Beanspruchungen standhalten können.

Die gewählten induktiven Aufnehmer mit loseem Tauchanker sind im Kabelanschluß durch eine dichte Ummantelung vor Feuchtigkeit geschützt. Die Anschlußkabel sind mit Silikonschläuchen ummantelt, die auch nach langem Einsatz im feucht-heißen Klima keinerlei Versprödung zeigen. Die Wegaufnehmer wurden von der Fa. Hottinger Baldwin Meßtechnik, Darmstadt, auf der Basis serienmäßiger Aufnehmer W1E hergestellt.

Der erforderliche Nennweg der Aufnehmer, unter Berücksichtigung von thermischen Dehnungen, Schwinden bzw. Quellen elastischer und Kriechdehnungen, beträgt bei einer Meßbasis von 300 mm ca. 1,3 mm. Der Nennmeßweg der gewählten Aufnehmer von $\pm 1,0 \text{ mm}$ um die Nulllage ist also bei entsprechender Ausnutzung in einer Meßrichtung ausreichend und gewährleistet eine hohe Auflösung der Dehnungswerte.

Die Meßlänge 300 mm befindet sich mittig auf der Probekörperhöhe von 600 mm, liegt also außerhalb der Bereiche, die durch die Lasteintragsplatten querdehnungsbehindert sind.

Je Probekörper werden drei Wegaufnehmer in einem Umfangswinkel von 120° zueinander auf den Umfang verteilt verwendet. Sie werden auf Klemmblocke montiert, die eine gehärtete Schneide besitzen und von einem umlaufenden Aluminium-Spannring an den Probekörper gepreßt werden. Die Klemmblocke bestehen aus härtbarem Edelstahl (Werkstoff-Nr. 1.4528). Die gehärteten Schneiden an den Meßblöcken garantieren eine exakt definierte Länge der Meßbasis und sichern das Meßsystem auf dem Probekörper gegen Verschiebungen. Zur Überbrückung der Meßbasis von 300 mm dienen Stangen aus sog. Invar-Stahl mit einem Durchmesser von 6 mm, der über eine sehr geringe Temperaturdehnzahl von etwa $\alpha_T = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ verfügt. Die Stangen stehen auf Meßblöcken, die kugelförmige Auflagerpunkte haben.

Abb. 27 zeigt einen montierten unteren Meßring mit den Aufstandspunkten für die Invar-Stangen. Im schematischen Längsschnitt durch das montierte Meßsystem auf Abb. 28 wird die Funktionsweise des Systems deutlich. Abb. 29 zeigt einen oberen Meßblock im Maßstab 2:1 in Draufsicht und Schnitt, und Abb. 30 enthält die entsprechenden Darstellungen eines unteren Meßblocks. Die Fotos der Abb. 31 bis 33 zeigen einen oberen Meßring und das montierte Meßsystem auf Probekörpern im Prüfraum.

Trotz der Verwendung von Invar-Stahl weist das Meßsystem thermische Eigendehnungen auf, die bei der Auswertung der Verformungsmessungen des Betons zu berücksichtigen sind. Zur Ermittlung der Temperaturdehnung des Meßsystems wurden Eichversuche auf einem Stahlzylinder mit 150 mm Durchmesser durchgeführt. Zuvor war die Temperaturdehnzahl des Stahles, unter Verwendung eines temperatur-kompensierten Quarzglas-Dilatometers, zu $\alpha_T = 12,14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ ermittelt worden. Dann wurde derselbe Stahlzylinder mit montiertem Meßsystem aufgeheizt und wieder abgekühlt. Dabei ergab sich der in Abb. 34 dargestellte Dehnungsverlauf über der Temperatur, der als linear und hysteresefrei angesehen werden kann. Auch mehrmalige Aufheizzyklen nacheinander führten zu einem ähnlichen

Bild. Aus den gemessenen Werten ergibt sich eine lineare Dehnzahl $\alpha_T = 9,64 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Diese Dehnzahl entspricht der Differenz der Temperaturdehnungen von Stahlzylinder und Meßsystem. Eine lineare Temperaturdehnung des Stahles vorausgesetzt, ergibt sich, daß das Meßsystem nur eine geringe, lineare und hysteresefreie Temperatureigendehnung folgendes Betrages aufweist:

$$\alpha_{T, \text{Meßsystem}} = 12,14 \cdot 10^{-6} - 9,64 \cdot 10^{-6} = 2,50 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

Dieser α_T -Wert ist bei Verformungsmessungen auf Beton zu berücksichtigen.

Zur Anpassung, Verstärkung und Ausgabe der Meßwerte für Verformungen und Temperaturen (über Thermoelemente) dient eine Meßwert-erfassungs- und Umschaltanlage. Die verwendete Anlage (UPH 3200, Fa. HBM) arbeitet mit Halbleiterschaltern, die im Vergleich zu üblicherweise verwendeten Relais prellfrei, schneller und verschleißfrei arbeiten und eine hohe Langzeitstabilität des Nullpunktes gewährleisten. Die Meßwerte werden mit einem mechanischen Zeilendrucker registriert, können aber bei Vorhandensein eines geeigneten Interfaces auch rechnergestützt weiterverarbeitet werden.

4. Zusammenfassung

Zum Betonkriechen bei erhöhter Temperatur bis ca. 95 °C und hoher Luftfeuchtigkeit im instationären Zustand ist der Kenntnisstand gering. Derartige klimatische Bedingungen sind aber für eine Reihe von Bauwerken der Energietechnik, wie z.B. Wärmespeicherbecken, Meerwasserentsalzungsanlagen und Kühltürme relevant. Die Aufgabe des vorliegenden Forschungsvorhabens war es deshalb, eine Versuchstechnik zu entwickeln und zu erproben, die geeignet ist:

- zutreffende Klimabedingungen zu erzeugen,
- Betonproben in diesem Klima einachsigt zu belasten und diese Belastung auch bei instationärer Temperatur langfristig konstant zu halten, sowie
- unter der Belastung auftretende Verformungen (Kriechen) trotz des instationären, heiß-feuchten Klimas zuverlässig zu messen.

Hierzu wurden zunächst die Probleme der Prüftechnik des Betonkriechens unter instationären, thermisch-hygrischen Bedingungen aufgezeigt und die Eignung bekannter Prüfkonzeppte untersucht. Als geeignet erwies sich eine Prüfstandkonstruktion, die Hohlzylinder als Probekörper vorsieht, diese Probekörper mit Hilfe von Hydraulik belastet und die Last mittels Tellerfedern konstant hält, sowie die Betonverformungen mit induktiven Wegaufnehmern auf den Probekörpern innerhalb des Prüfraumes mißt. Die Konstruktion, Funktion und Erprobung der Anlage werden detailliert dargestellt.

5. Literatur

- /1/ Kurzbeschreibung der elektrischen und mechanischen Verfahren in der experimentellen Spannungsanalyse, Gemeinschaft experimentelle Spannungsanalyse (GESA) im VDI, Entwurf, Dez. 1982
- /2/ Bertero, V.V.; Bresler, B.; Polivka, M.: Instrumentation and techniques for study of concrete properties at elevated temperatures. ACI, SP. 34-64, 1970, S. 1377-1419
- /3/ Browne, R.D.; McChurich, L.H.: Measurement of strain in concrete pressure vessels. Proc. Conf. Prestressed Concr. Press. Vessels, Inst. of Civil Eng., London, 1968, S. 615-625
- /4/ Cruz, C.R.: Apparatus for measuring creep of concrete at high temperatures. Journal of the PCA, Sept. 1968, S. 36-42
- /5/ Gamble, B.R.: Criteria and designs for creep apparatus. Concrete, Dez. 1975, S. 26-28
- /6/ Geymayer, H.: Zum Einfluß erhöhter Temperaturen auf das Formänderungsverhalten von Beton. Zement und Beton, Heft 63/64, 1972
- /7/ Hilsdorf, H.K.: Versuchstechnische Probleme beim Studium der Verformungseigenschaften des Betons. Materialprüfung, Heft 11, Nov. 1963, S. 421-428
- /8/ Illston, J.M.; Sanders, P.D.: Characteristics and prediction of creep of a saturated mortar under variable temperature. Mag. of Concrete Research, Vol. 26, No. 88, 1974
- /9/ Lohtia, R.P.; Nasser, K.W.: Apparatus for high temperature creep tests of concrete. ACI Journal, Feb. 1971, S. 114-115
- /10/ Müller, R.K.: Der Einfluß der Meßlänge auf die Ergebnisse der Dehnungsmessungen an Beton. Beton, 1964, Heft 5, S. 205-208
- /11/ Neville, A.M.; Dilger, W.H.; Brooks, J.J.: Creep of plain and structural concrete. Longman Inc., New York, 1983
- /12/ Newman, K.; Lachance, L.; Loveday, R.W.: Strain measurements of saturated concrete specimens. Mag. of Concrete Research, Vol. 15, 1963, S. 143-150
- /13/ Newman, K.: Concrete control tests as measures of the properties of concrete. Proc. of a Symp. on Concr. Quality, London, 1964, S. 120-138

- /14/ Parrott, L.J.: A study of transitional thermal creep in hardened cement paste. Mag. of Concrete Research, Vol. 31, No. 107, 1979
- /15/ Rohrbach, C.: Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1967
- /16/ Rostásy, F.S.; Budelmann, H.: Entwicklung eines Langzeitwärmespeichers als Prototyp Wolfsburg in Verbindung mit einem betrieblichen Fernwärmeversorgungsnetz - Untersuchung des Baustoffverhaltens bei hoher Temperatur und Feuchte. Untersuchungsbericht der aml. Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, TU Braunschweig, 1981
- /17/ Schneefuß, J.; Twelmeier, H.: Zusammenstellung und Beurteilung von Meßverfahren zur Ermittlung von Spannungen und Schnittgrößen in Stahlbetonbauteilen. Forschungsbericht, Inst. f. Statik, TU Braunschweig, April 1981
- /18/ Stöckl, S.; Linse, D.; Asche, H.: In München entwickelte maschinelle Ausstattung für Untersuchungen an Reaktorbeton. Vortrag, Spannbeton-Reaktordruckbehälter, DAfStb, Berlin 1975, Bd. 3/7
- /19/ Yuan, R.L.; Hilsdorf, H.K.; Kesler, C.E.: Effect of temperature on the drying of concrete. TAM Report No. 316, Univ. of Illinois, 1968

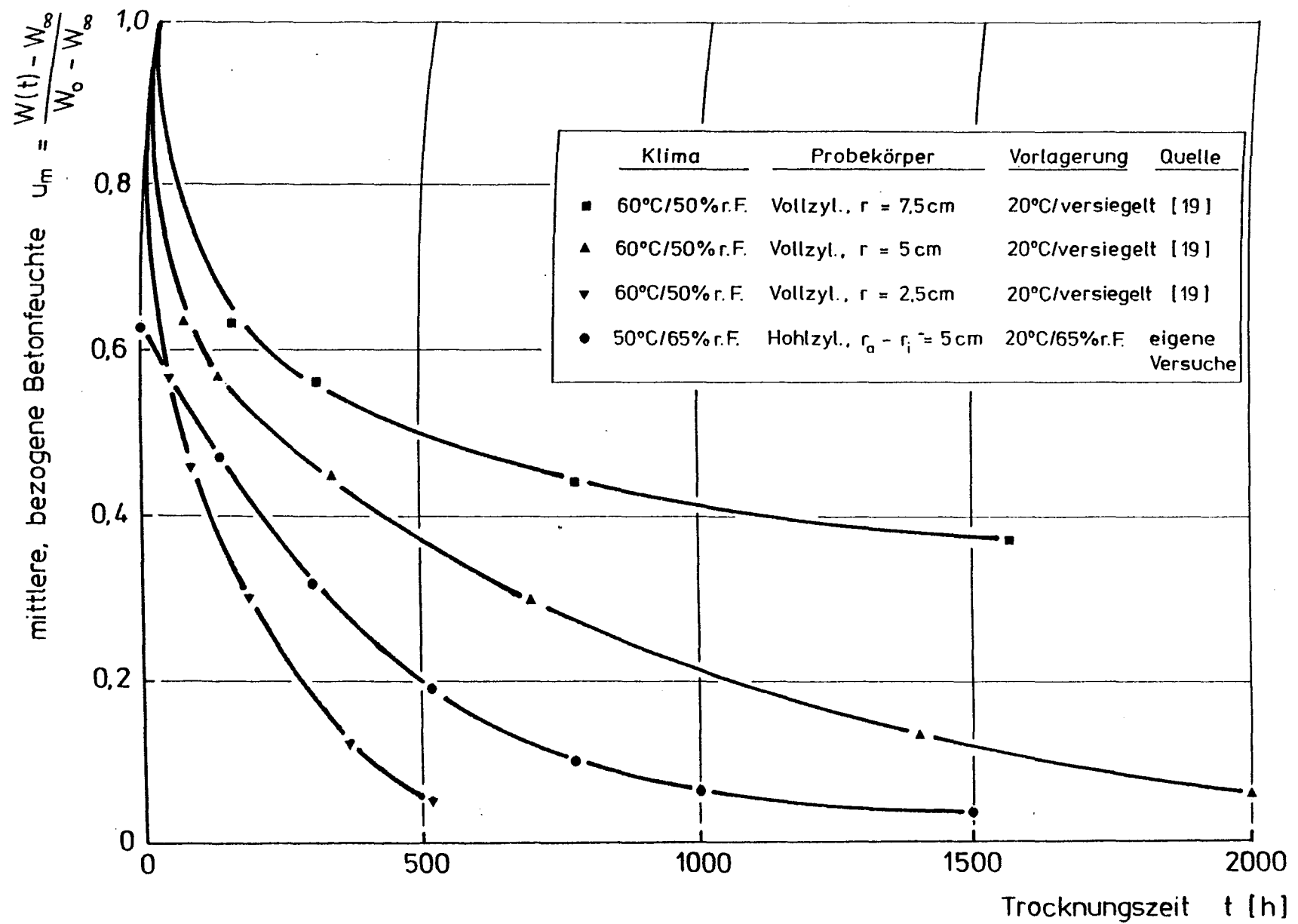
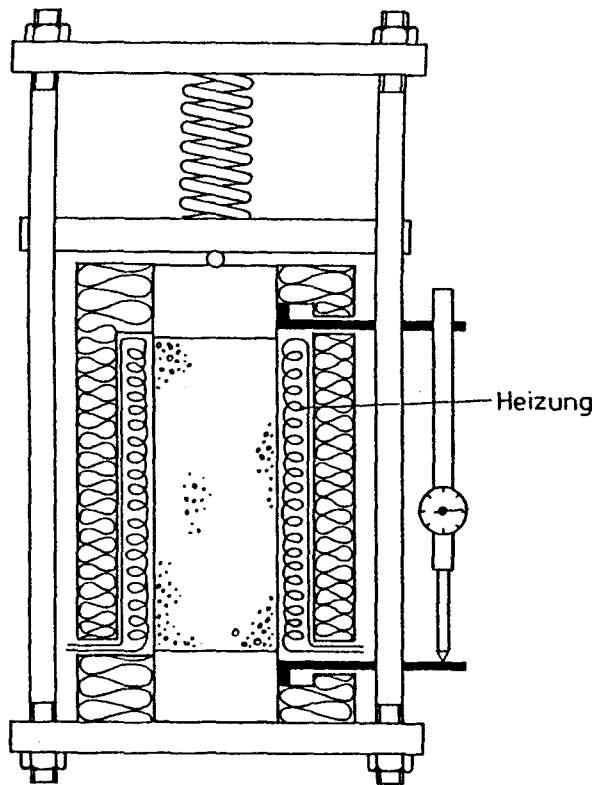
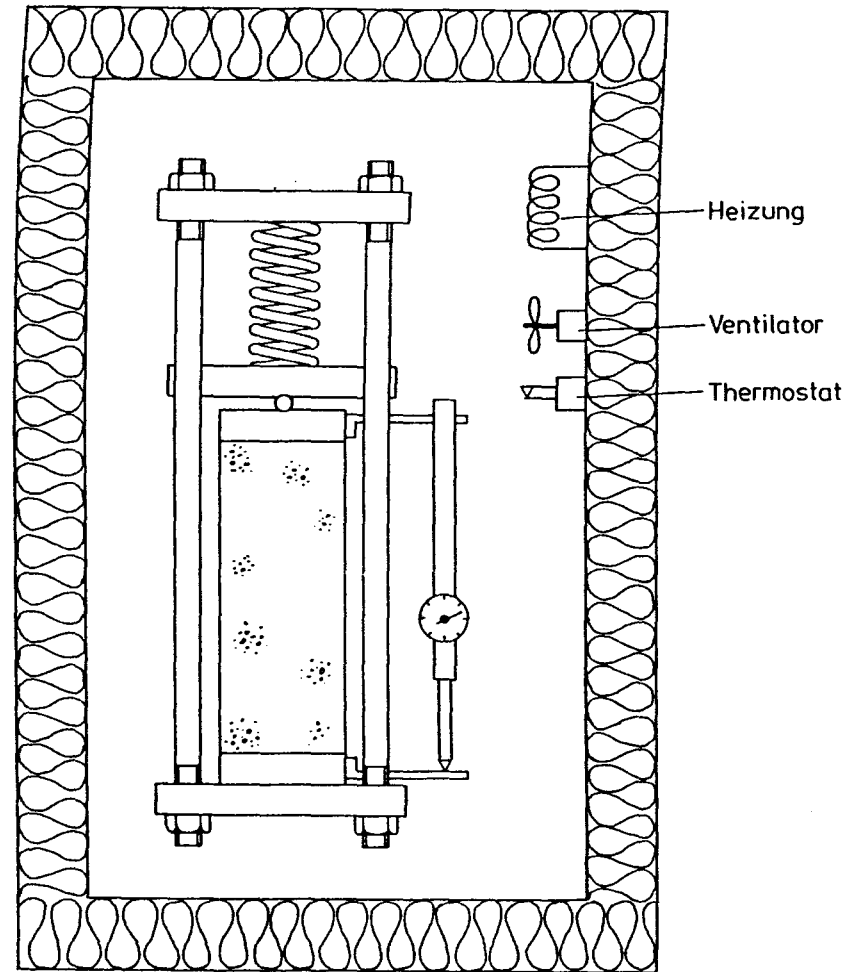


Abb. 1: Zeitlicher Trocknungsverlauf von Beton, $W/Z=0.55$, bei erhöhter Temperatur



Interne Beheizung



Externe Beheizung

Abb. 2: Gegenüberstellung der Klimatisierungsprinzipien "intern" und "extern"

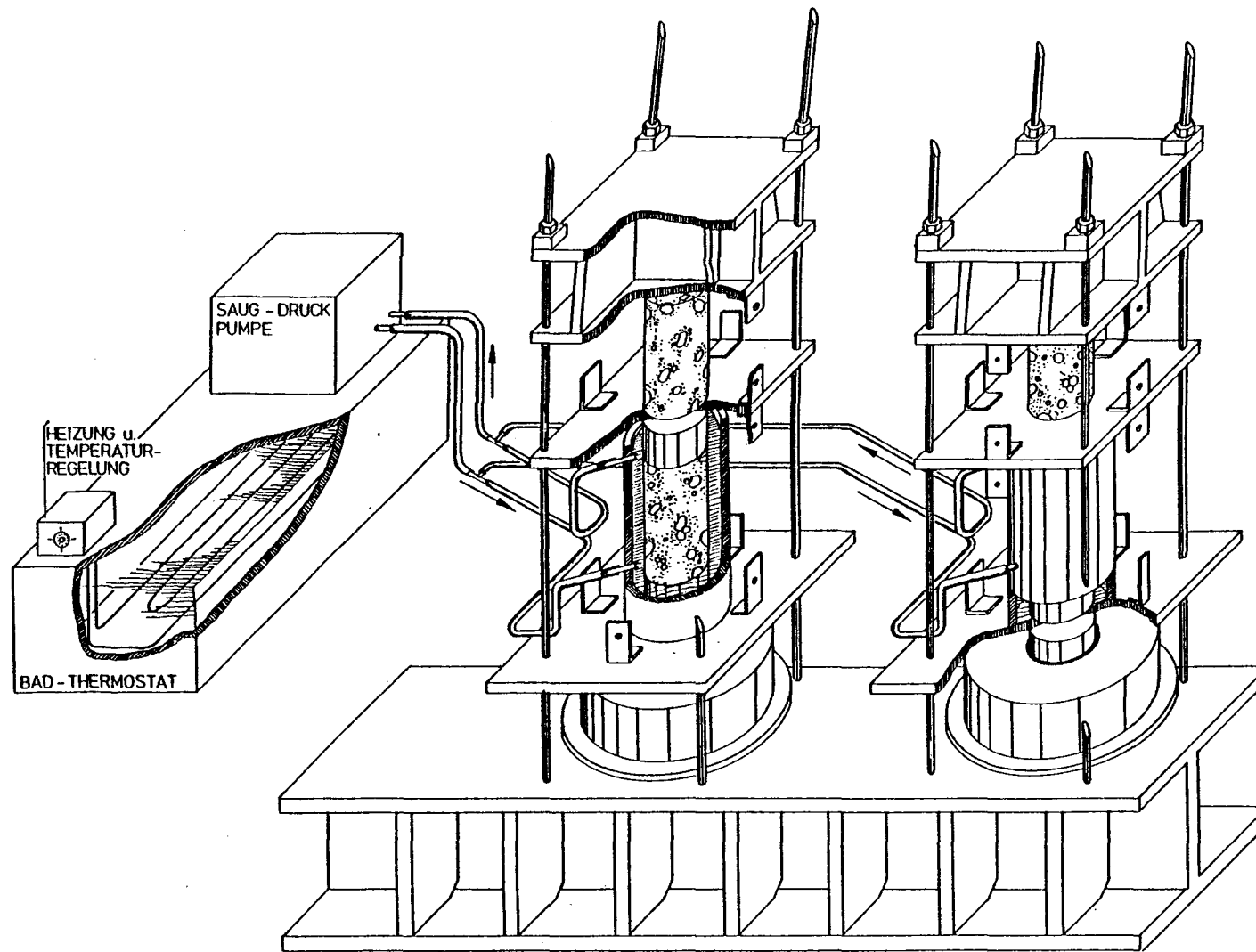


Abb. 3: Kriechversuchsstand für unter Wasser befindlichen Beton bei erhöhter Temperatur bis 95 °C, aus [16]

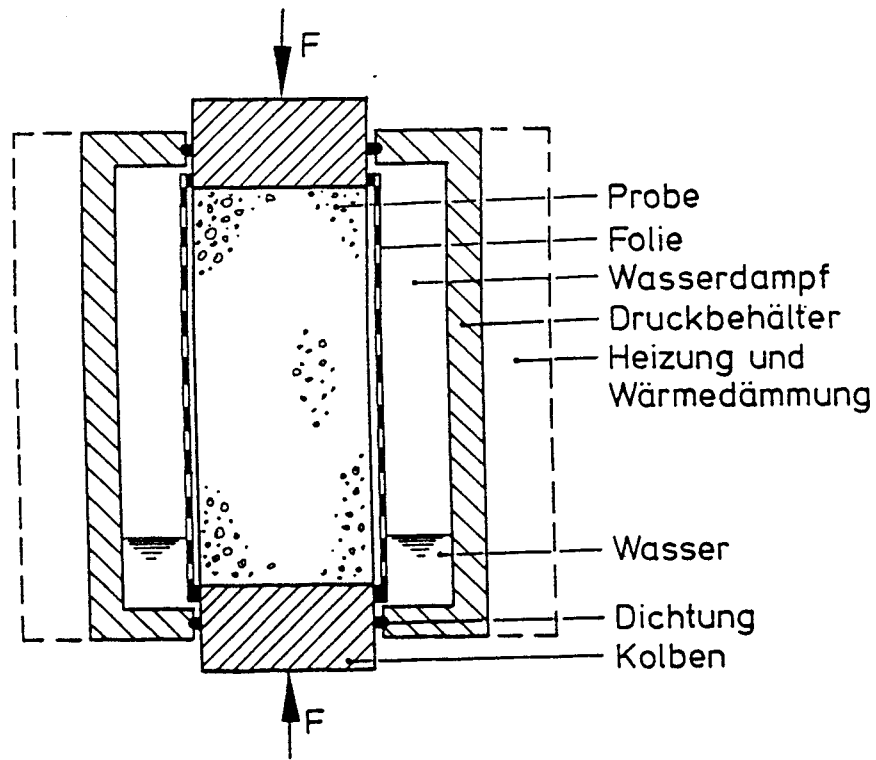


Abb. 4: Prüfprinzip zur Betonversiegelung bei erhöhter Temperatur, aus /6/

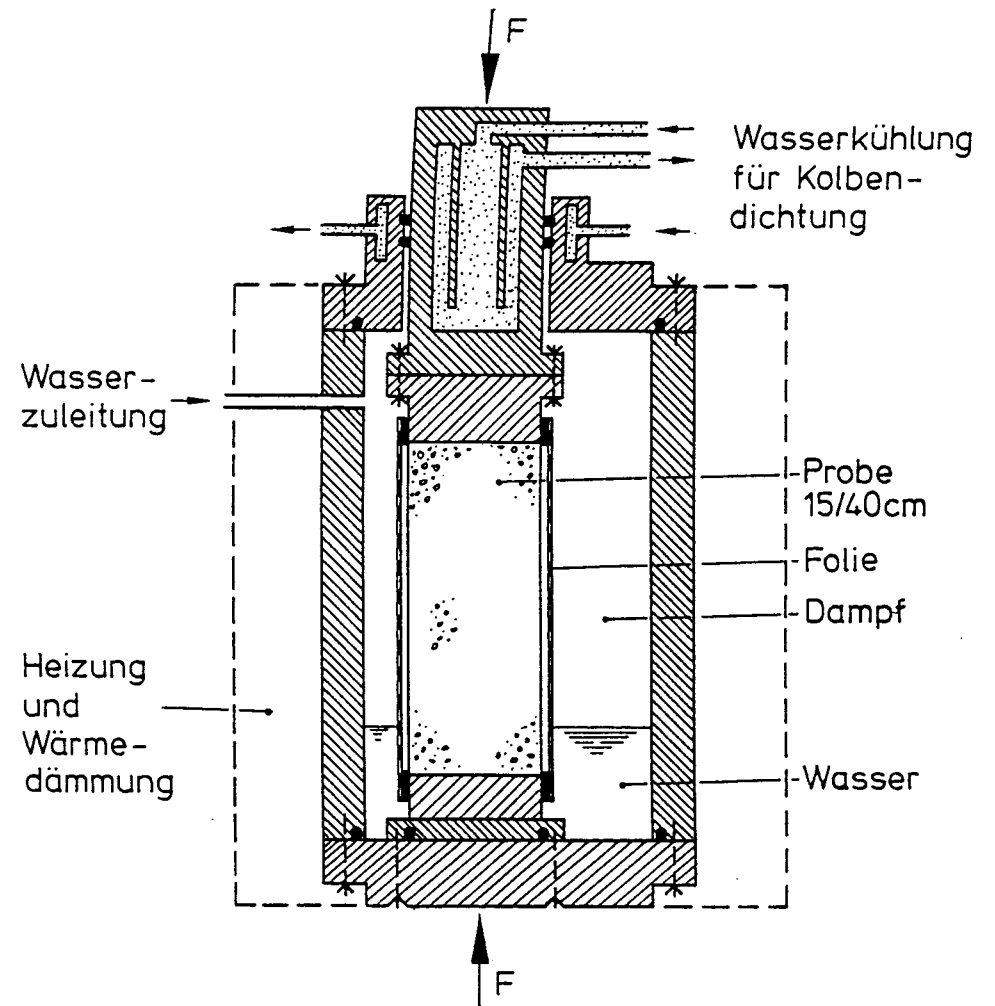


Abb. 5: Kriechzelle für versiegelten Beton, aus /18/

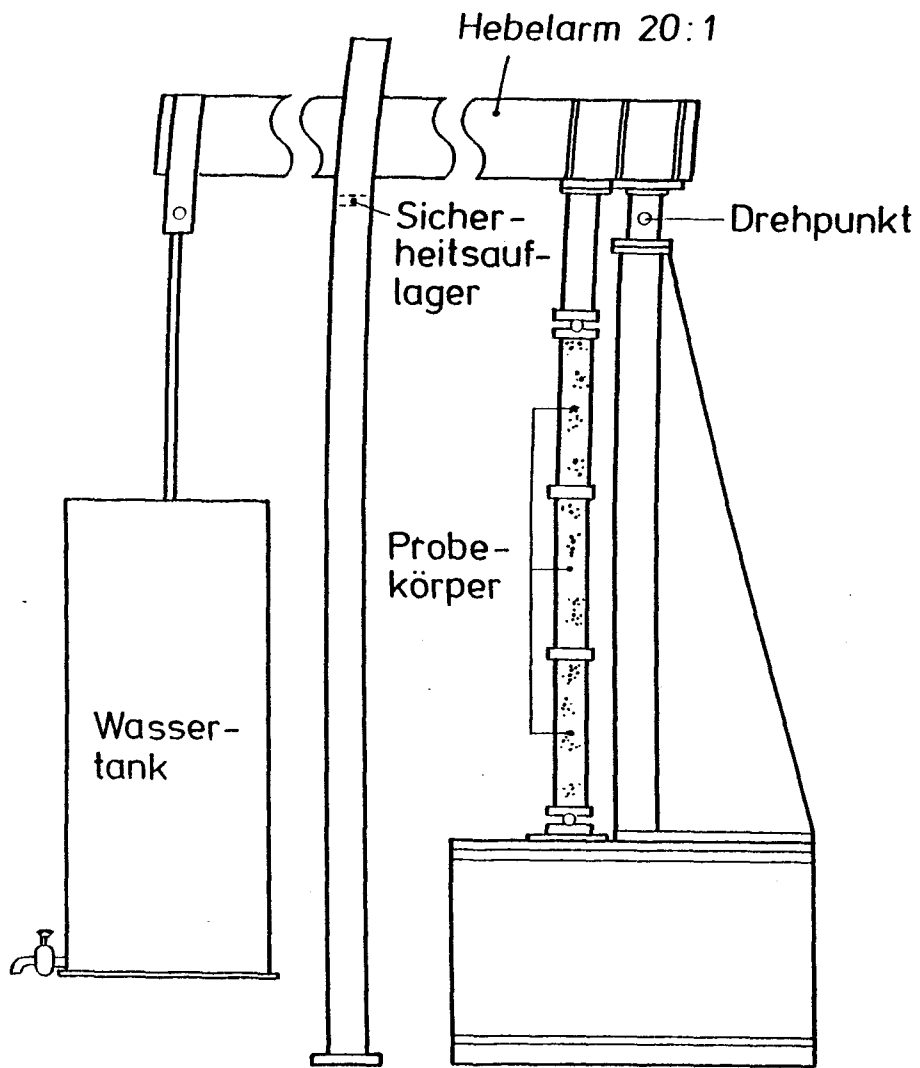


Abb. 6: Schemabild eines Kriechversuchsstandes mit Gewicht und Hebel

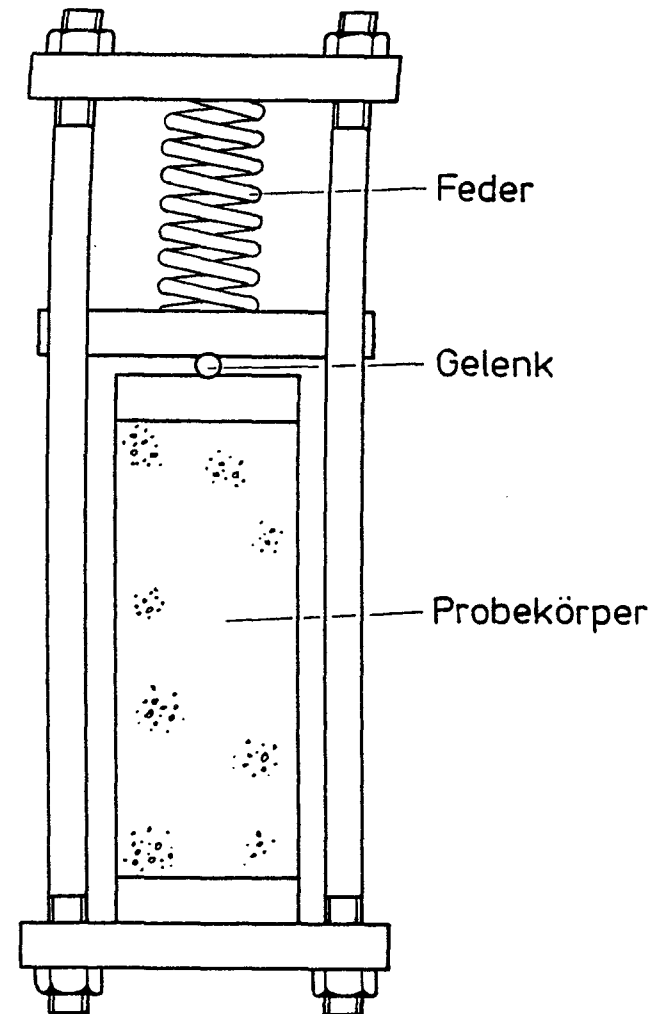


Abb. 7: Schemabild eines Kriechversuchsstandes mit Schraubenfeder

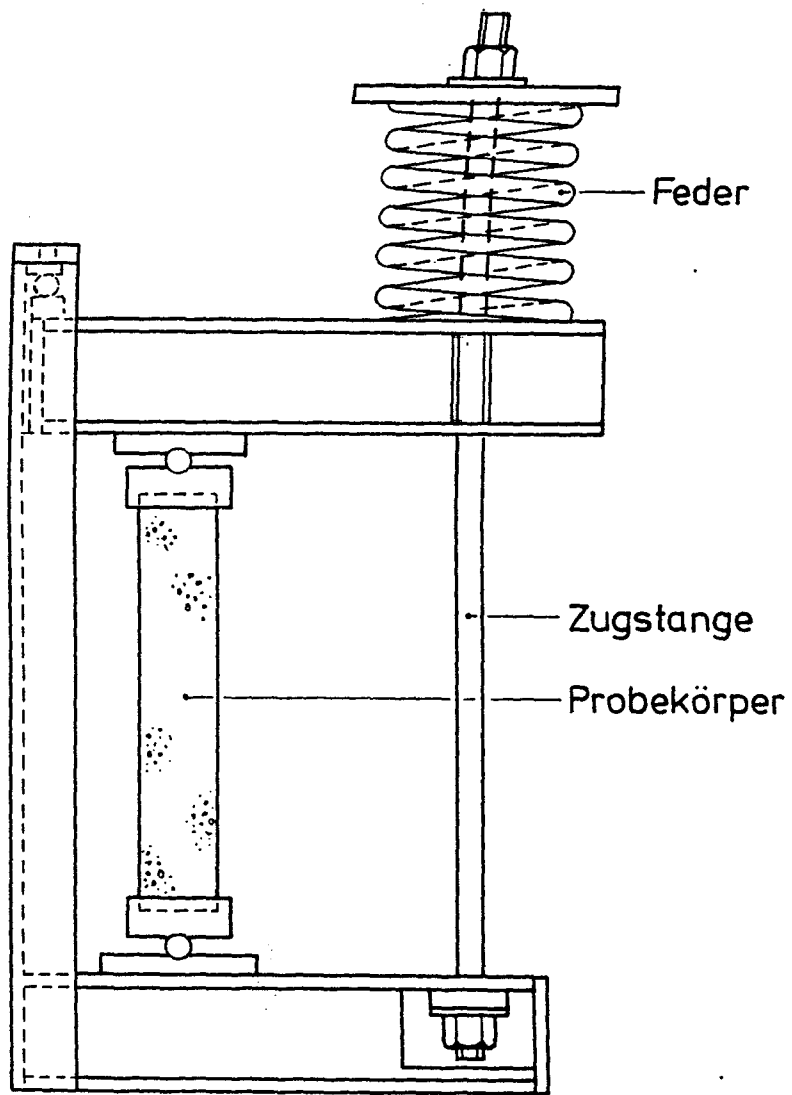


Abb. 8: Schemabild eines Kriechversuchsstandes mit Schraubenfeder und Hebel

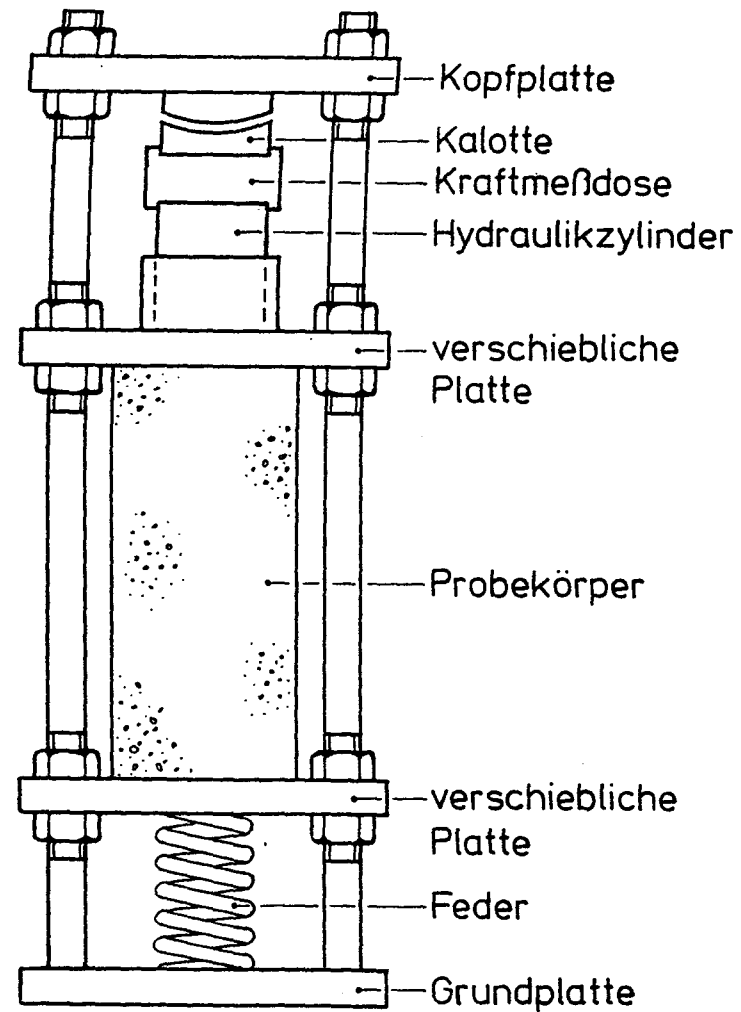


Abb. 9: Schemabild eines Kriechversuchsstandes für hydraulische Lasterzeugung und mechanische Konstanthaltung

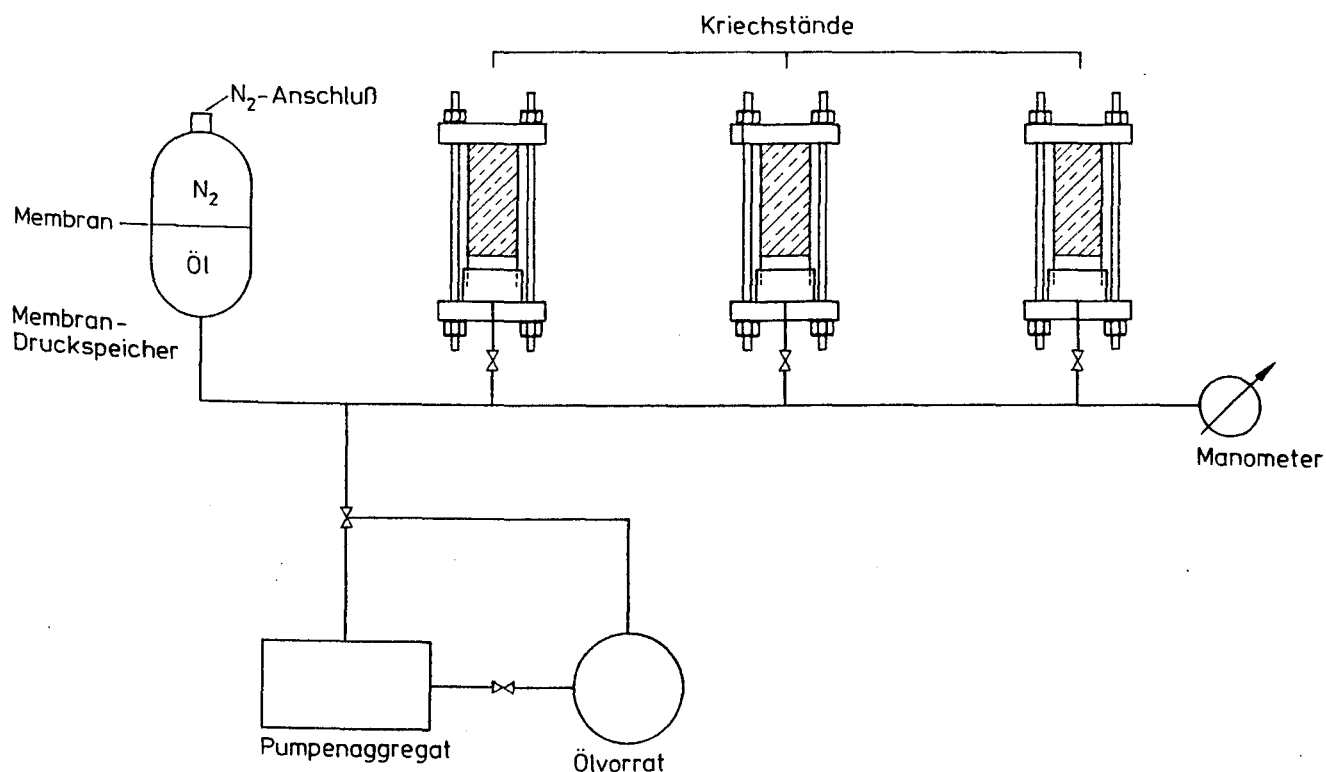


Abb. 10: Schemabild eines Serienkriechstandes für hydraulische Last-
erzeugung und pneumatische Konstanthaltung

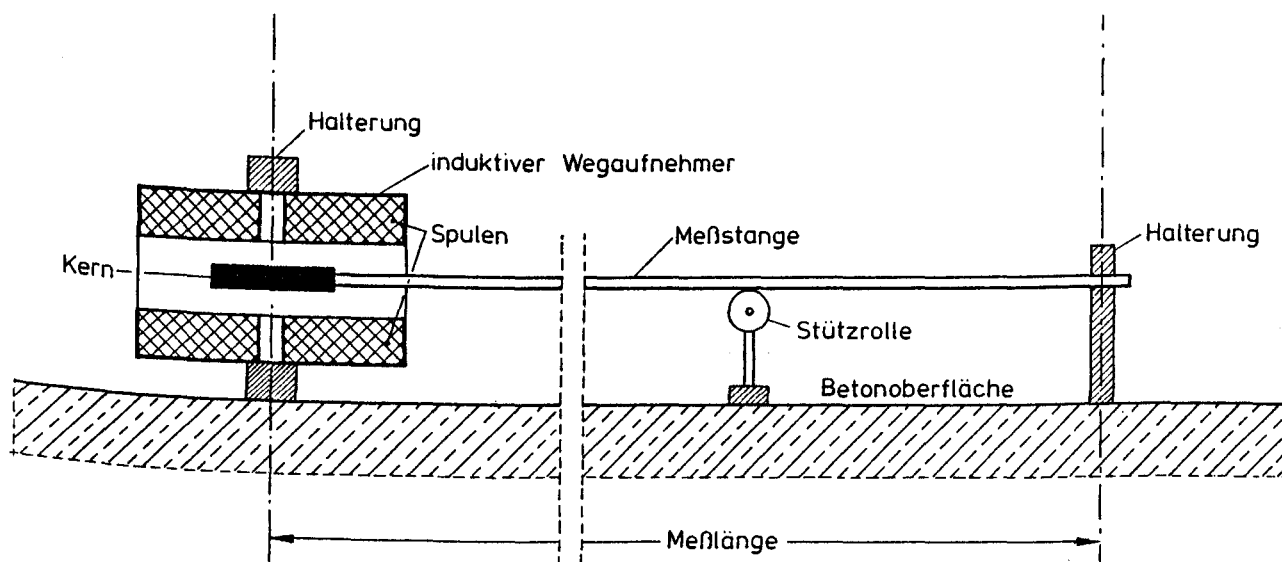
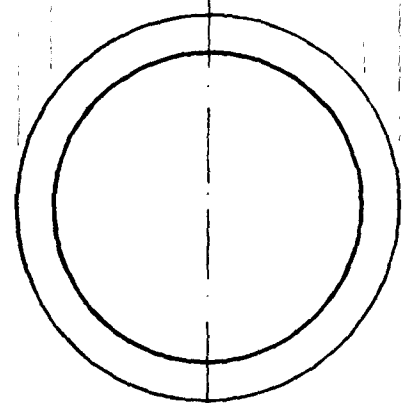
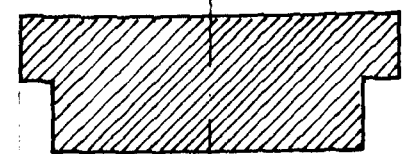
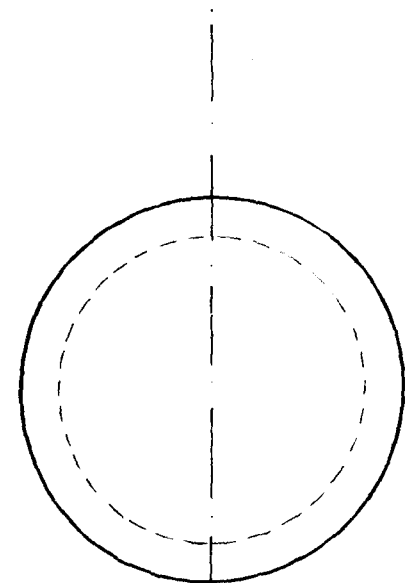
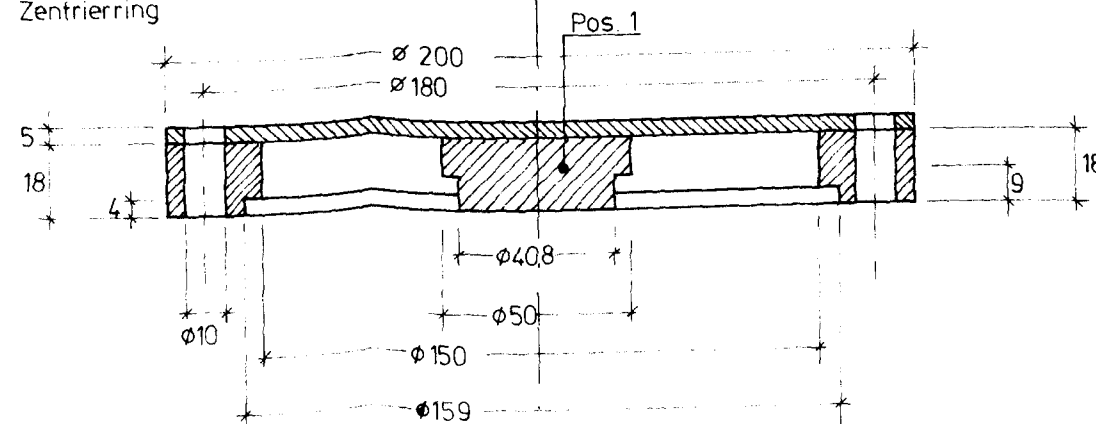


Abb. 11: Prinzip der Verformungsmessung mit induktiven Wegaufnehmern
auf der Betonoberfläche

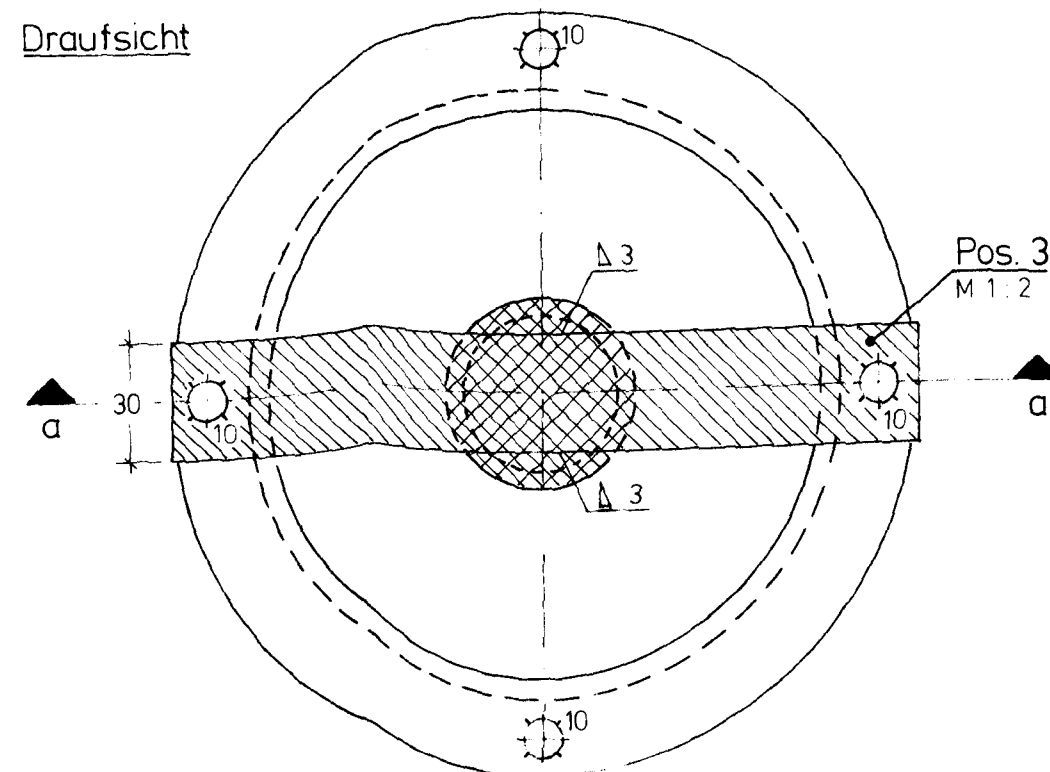
Pos. 1 M. 1:1



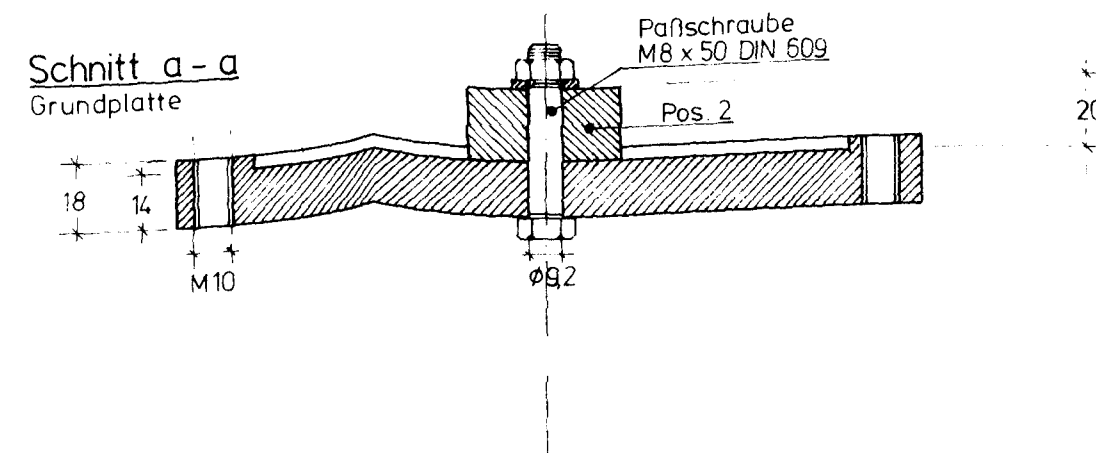
Schnitt a-a
Zentrierring



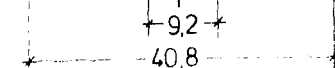
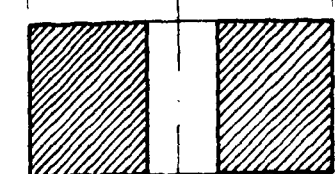
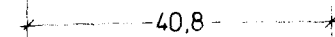
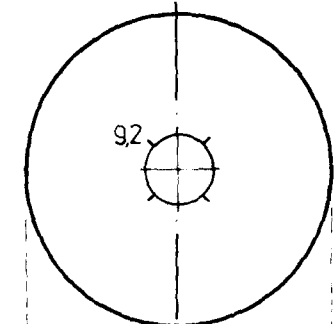
Draufsicht



Schnitt a-a
Grundplatte



Pos. 2 M. 1:1



Stückliste

Pos.	Anz.	Mat.
1	10	St 37
2	10	St 37
3	10	St 37
M 8 x 50	10	4.6

Abb. 12

ZYLINDERSCHALUNG 150 x 600

Kopf- und Fußausbildung

M. 1:2	Details M. 1:1	St 37
--------	-------------------	-------



Abb. 13: Zylinderschalung für Hohlzylinder

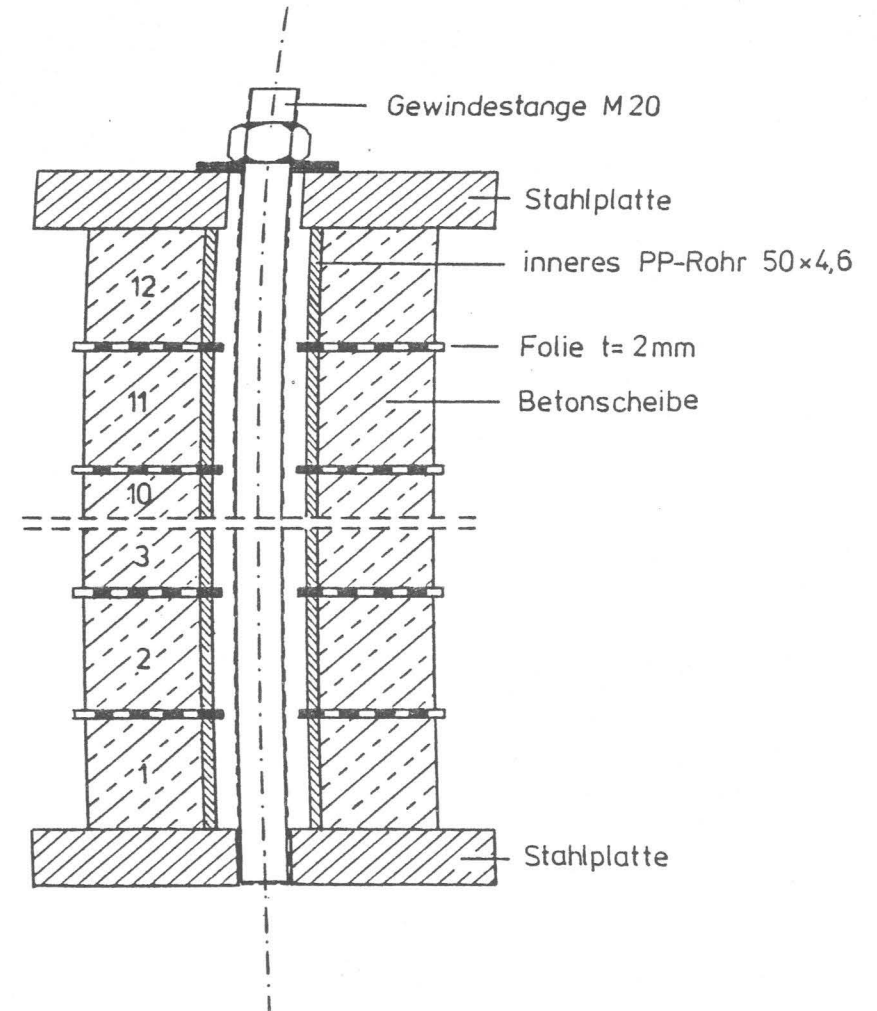


Abb. 14: Vertikalschnitt durch ein Scheibenpaket zur Ermittlung der Betonfeuchte

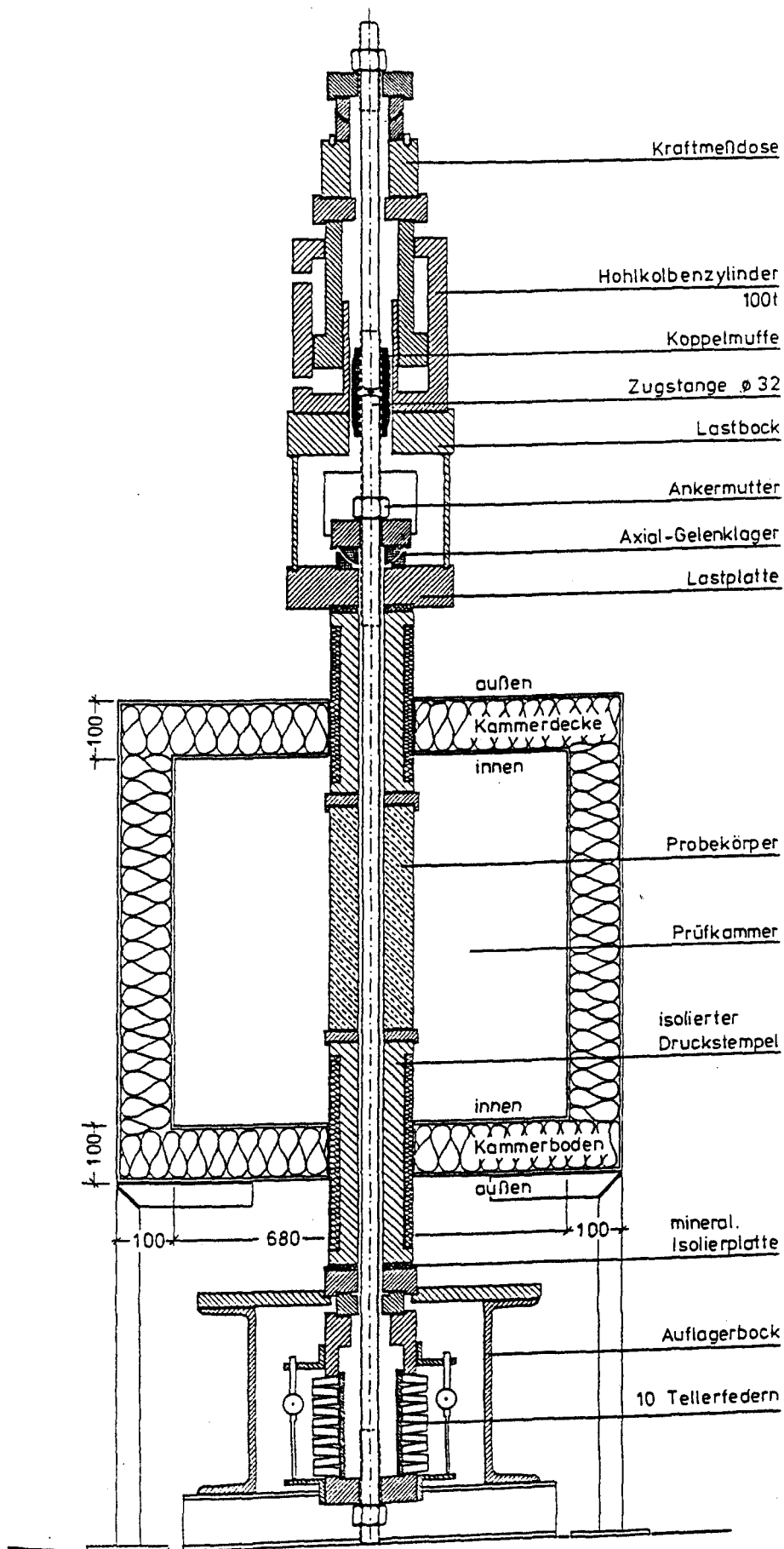


Abb. 15: Kriechversuchsstand für erhöhte Temperatur
bei beliebiger relativer Luftfeuchtigkeit

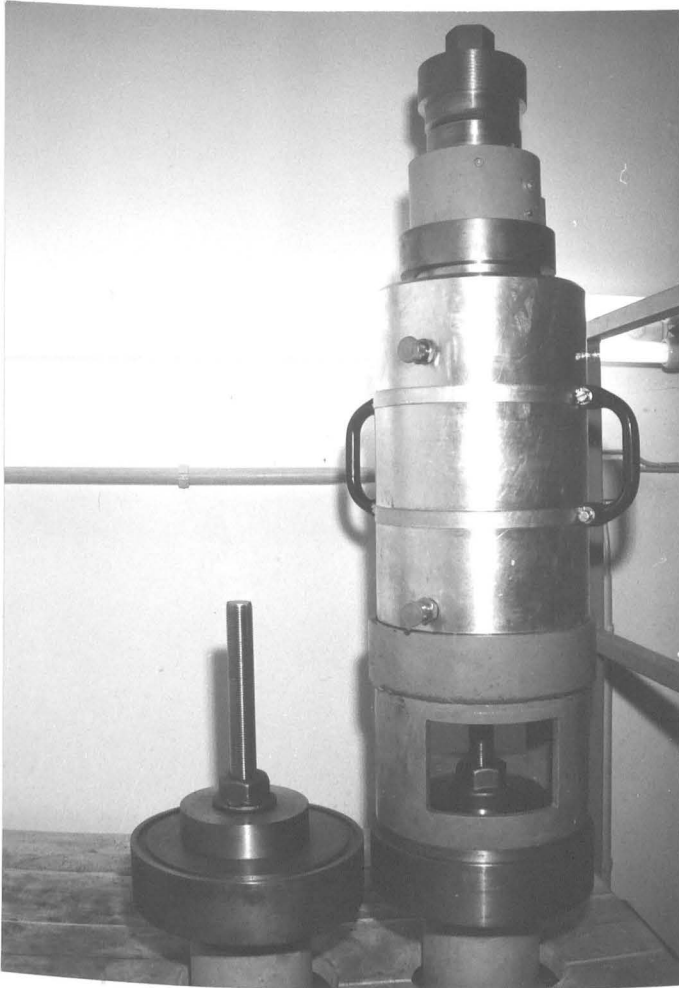


Abb. 16:

Prüfsäule mit aufgesetzter
Belastungseinrichtung

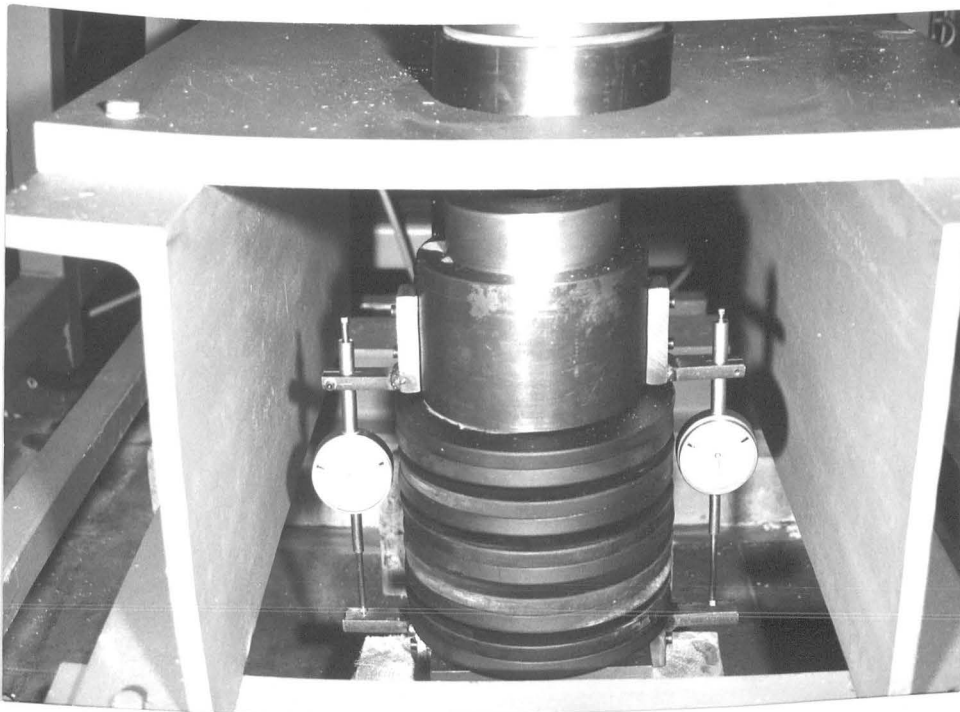


Abb. 17: Tellerfederpaket mit Meßuhren

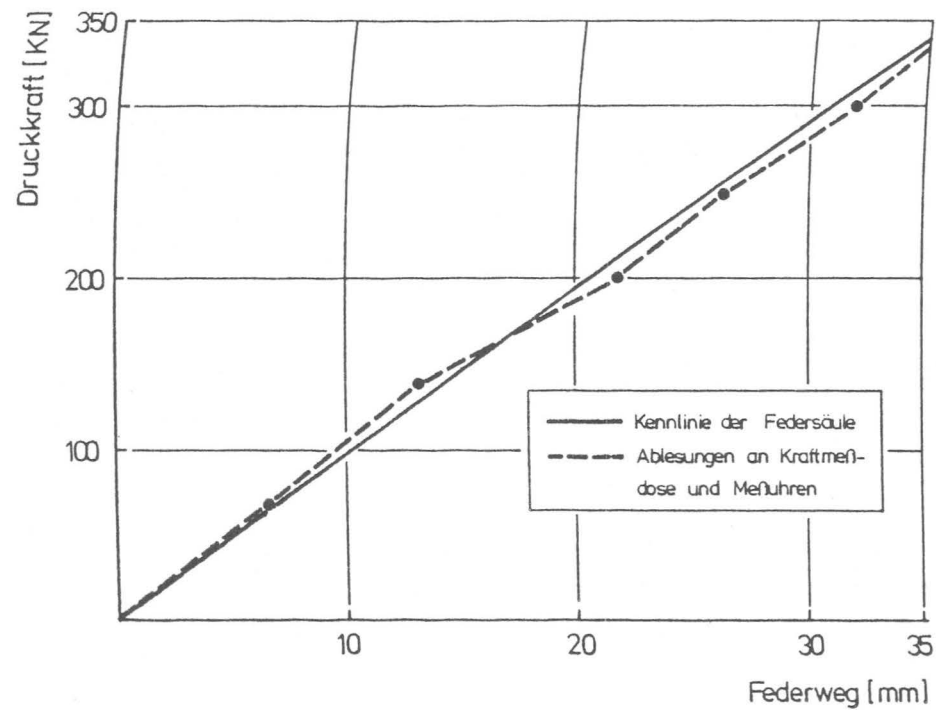


Abb. 18: Überprüfung der Federsäulen-Kennlinie

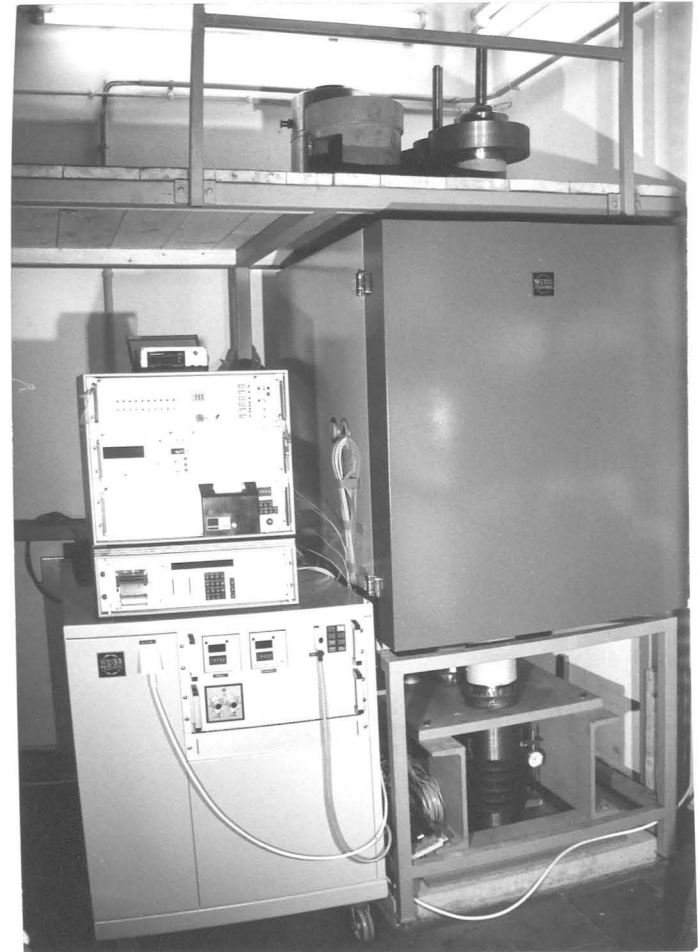


Abb. 19: Kompletter belasteter Prüfstand;
Belastungseinrichtung demontiert

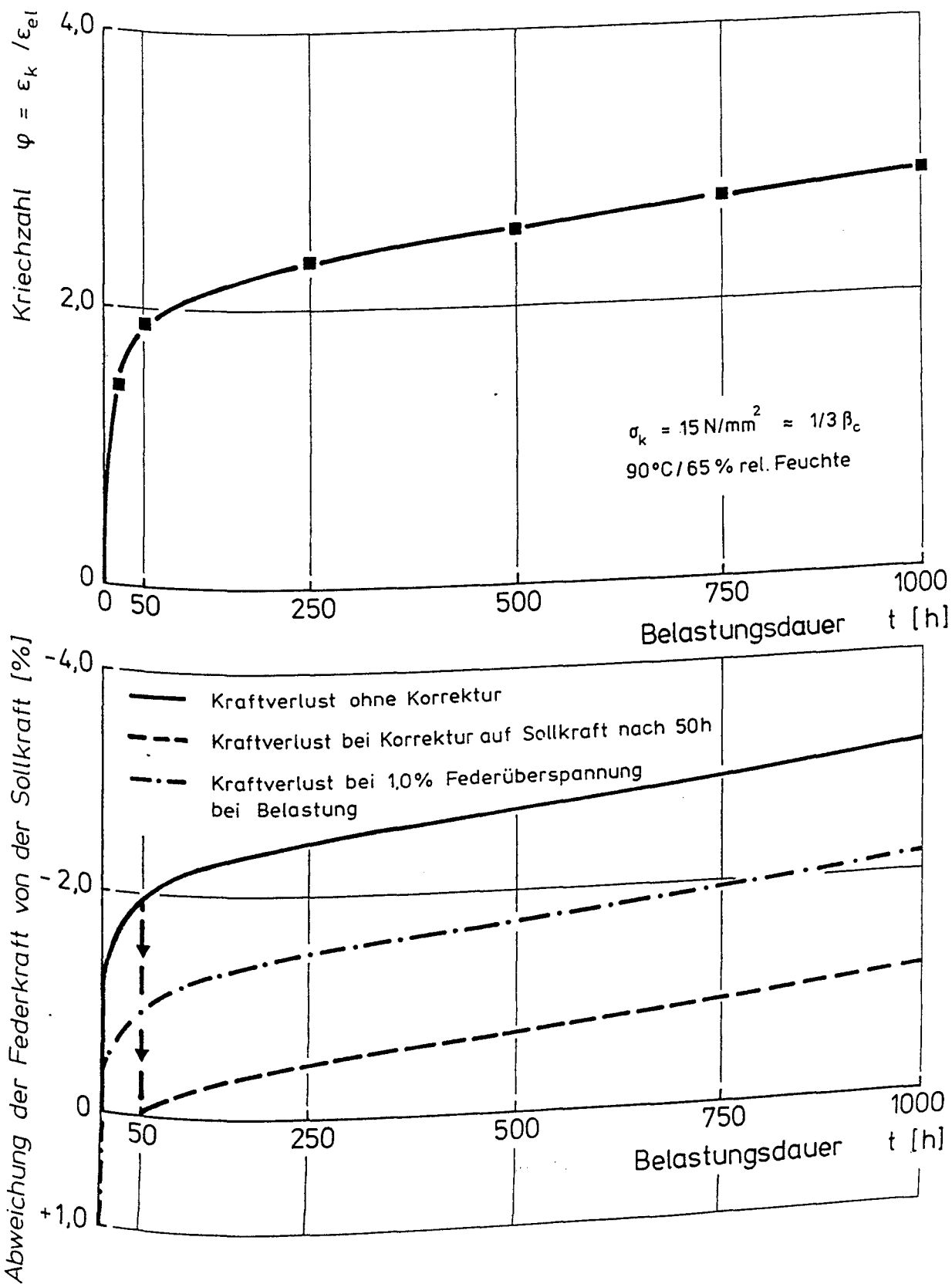


Abb. 20: Kraftverlust am Tellerfederpaket infolge Betonkriechens

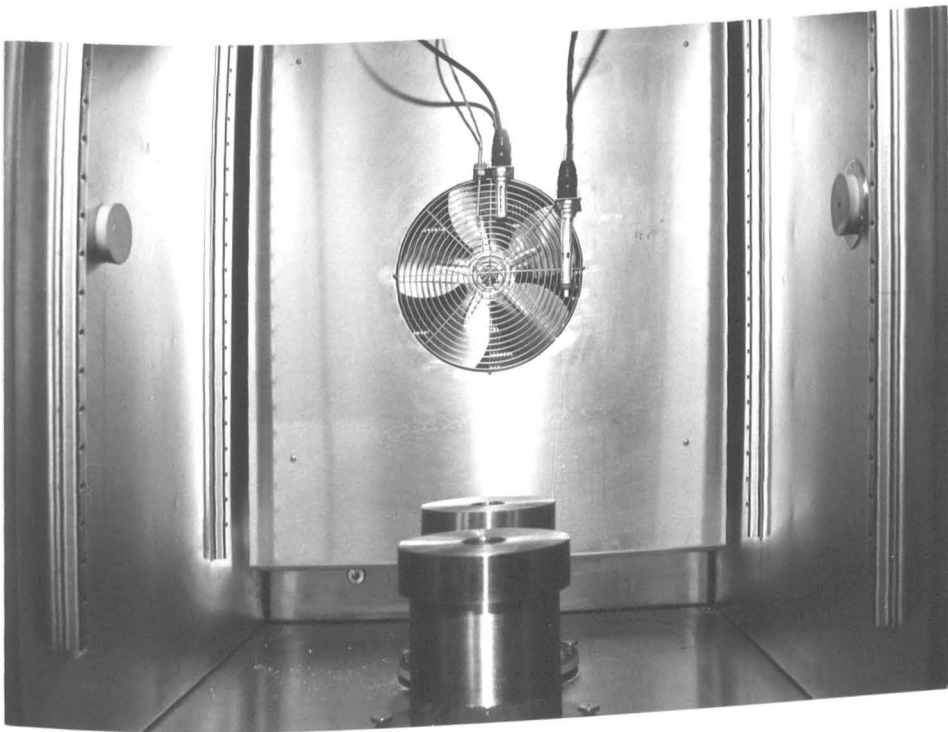
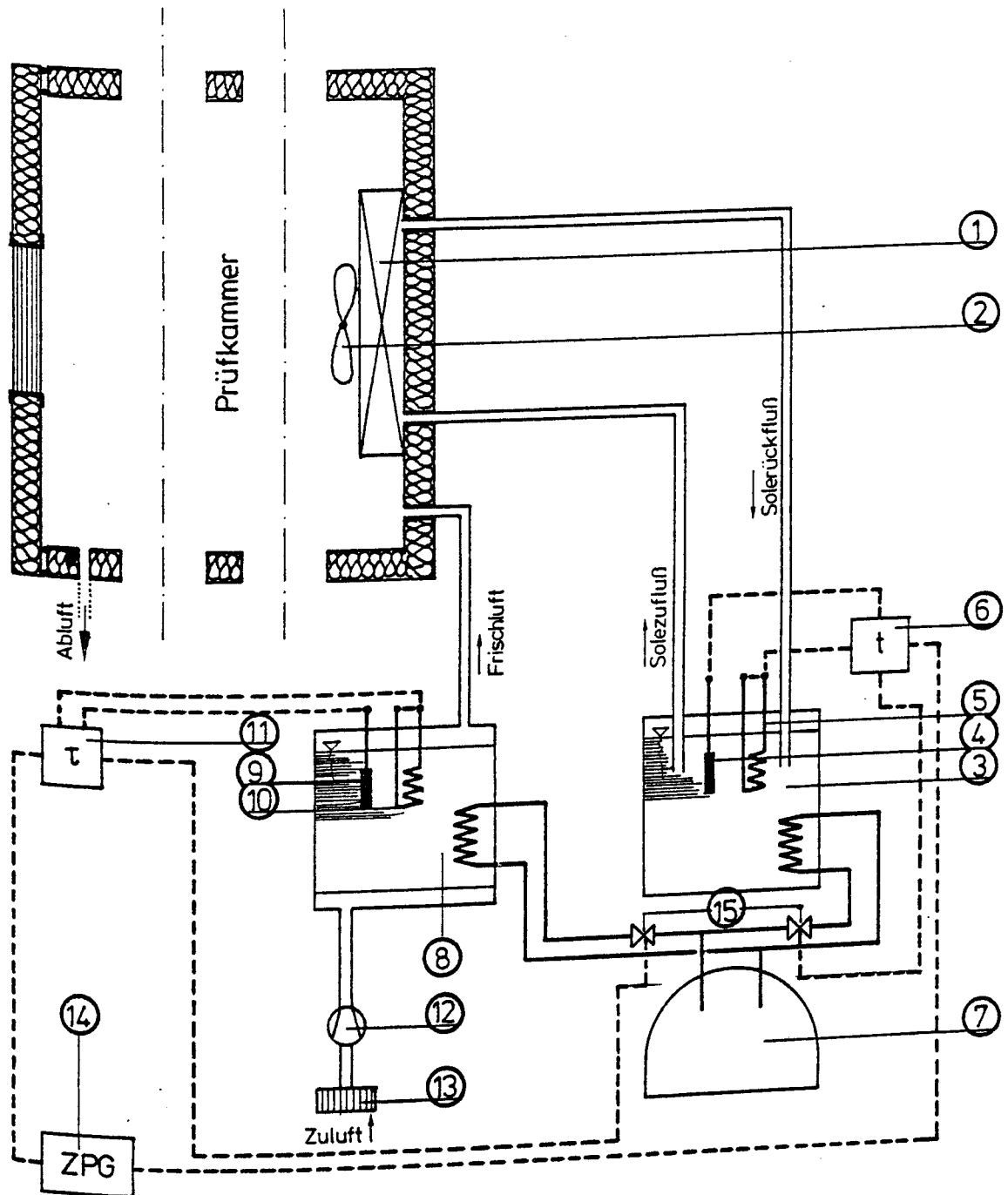


Abb. 21: Blick in den Prüfraum mit unteren Druckstempeln



- | | | |
|------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| 1 Wärmetauscher | 6 Soletemperaturregler | 11 Taupunkttemperaturregler |
| 2 Ventilator | 7 Kälteaggregat | 12 Luftpumpe |
| 3 Solebad | 8 Taupunkt-Wasserbad | 13 Luftfilter |
| 4 Soletemperaturfühler | 9 Taupunkttemperaturfühler | 14 Zeit-Programmgeber |
| 5 Soleheizung | 10 Heizung | 15 Magnetventile |

Abb. 22: Prinzipskizze der Klimatisierungseinrichtung

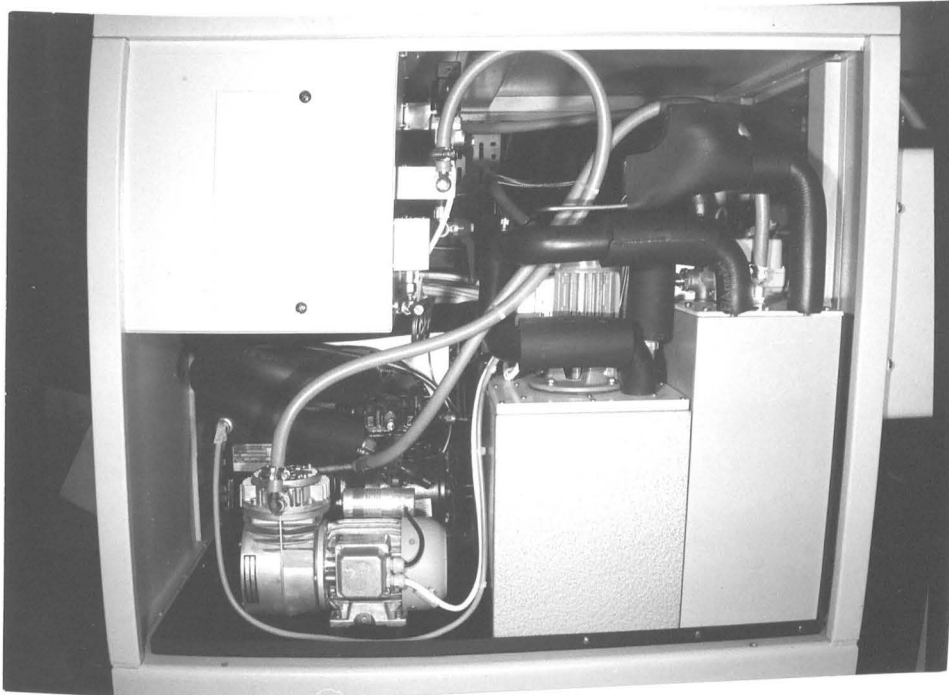


Abb. 23: Klimatisierungsaggregat (Befeuchter- und Solebad, Kältemaschine)



Abb. 24: Klimatisierungsaggregat (Kühler für Kältemaschine, Nachlaufgefäß, Luftpumpe)

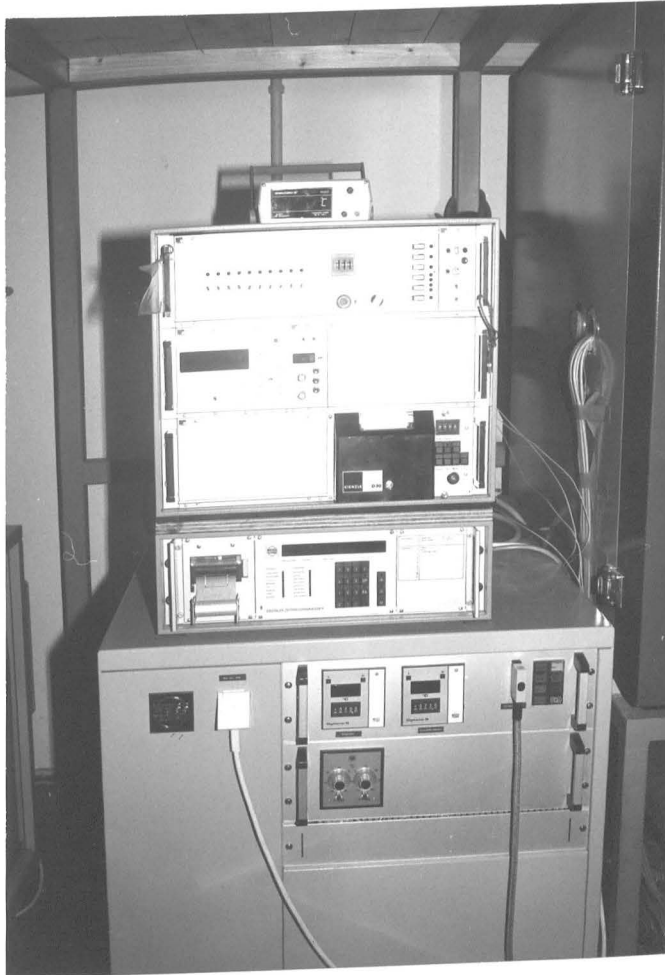


Abb. 25: Klimatisierungsaggregat,
Zeit-Programmgeber, Meßwert-
erfassungsanlage

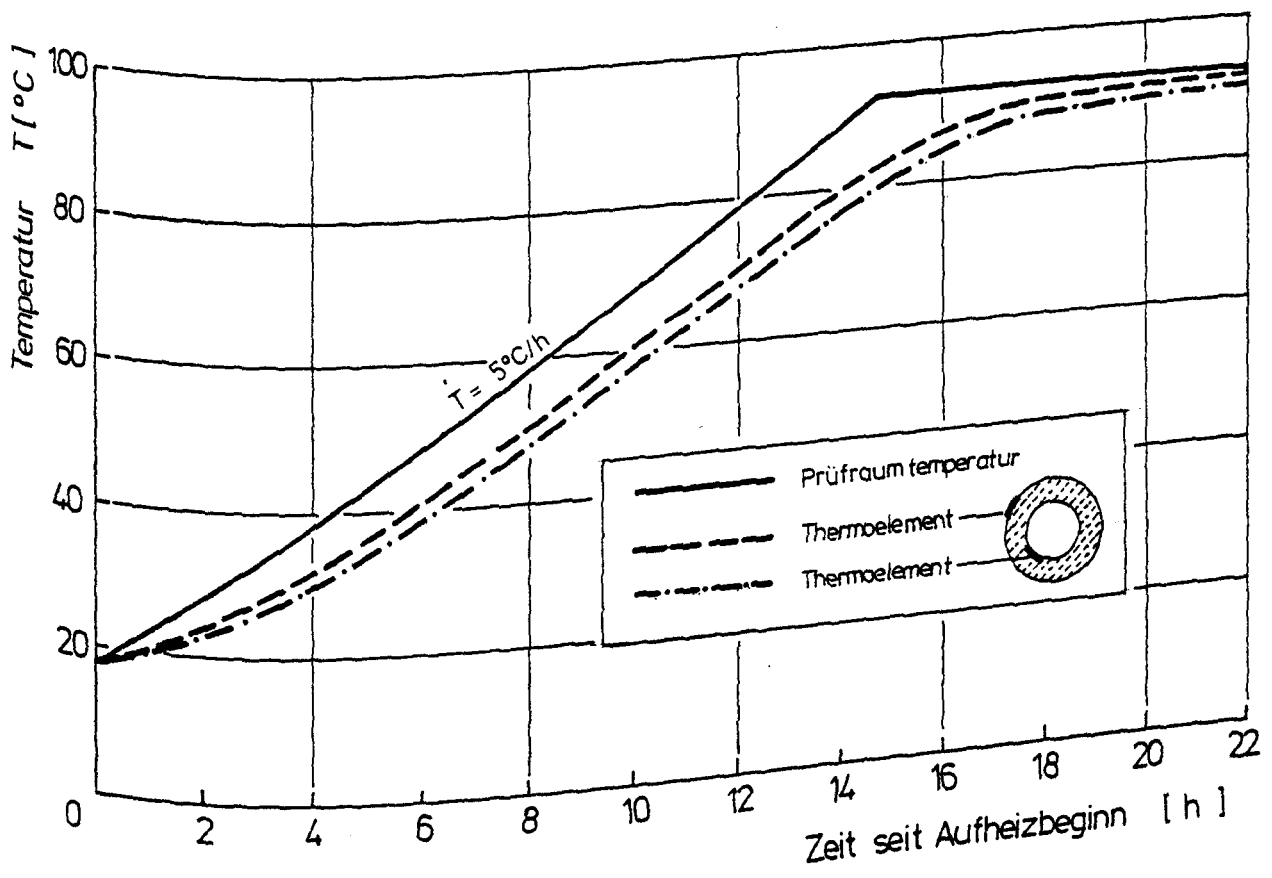


Abb. 26: Zeitlicher Aufheizverlauf an den Betonhohlzylindern

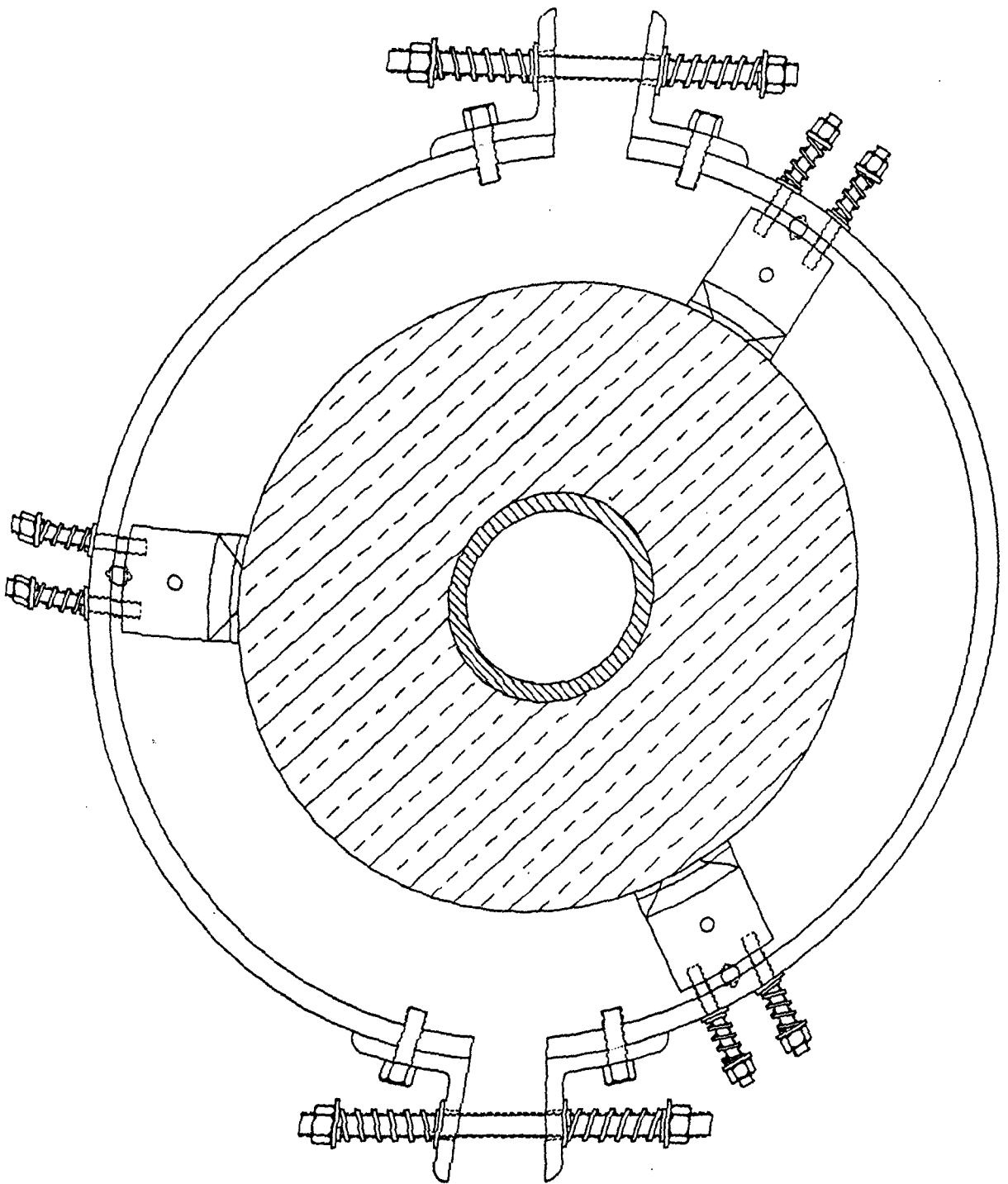


Abb. 27: Montierter unterer Meßring auf einem Betonhohlzylinder

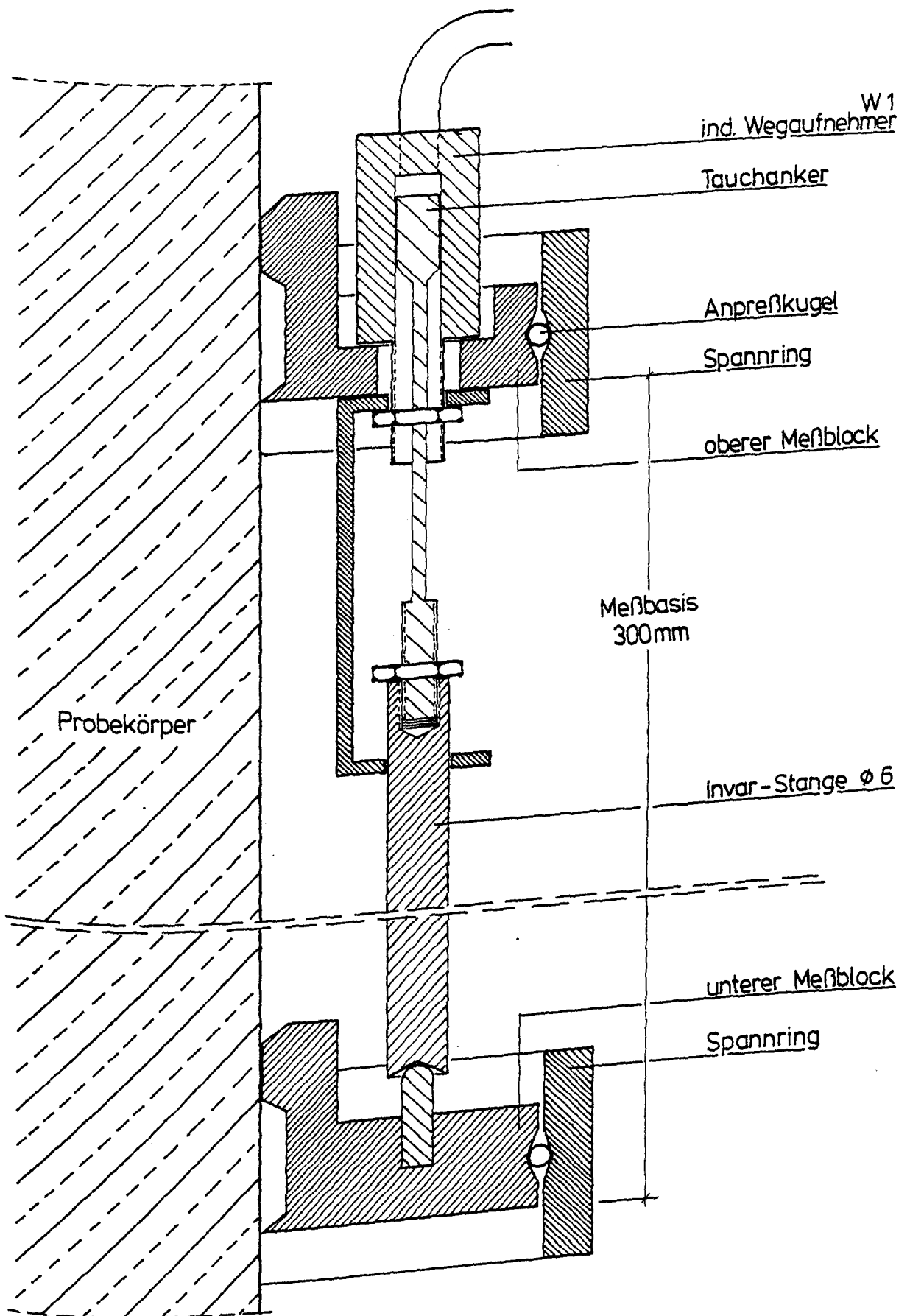


Abb. 28: Vertikalschnitt durch das Verformungsmeßsystem

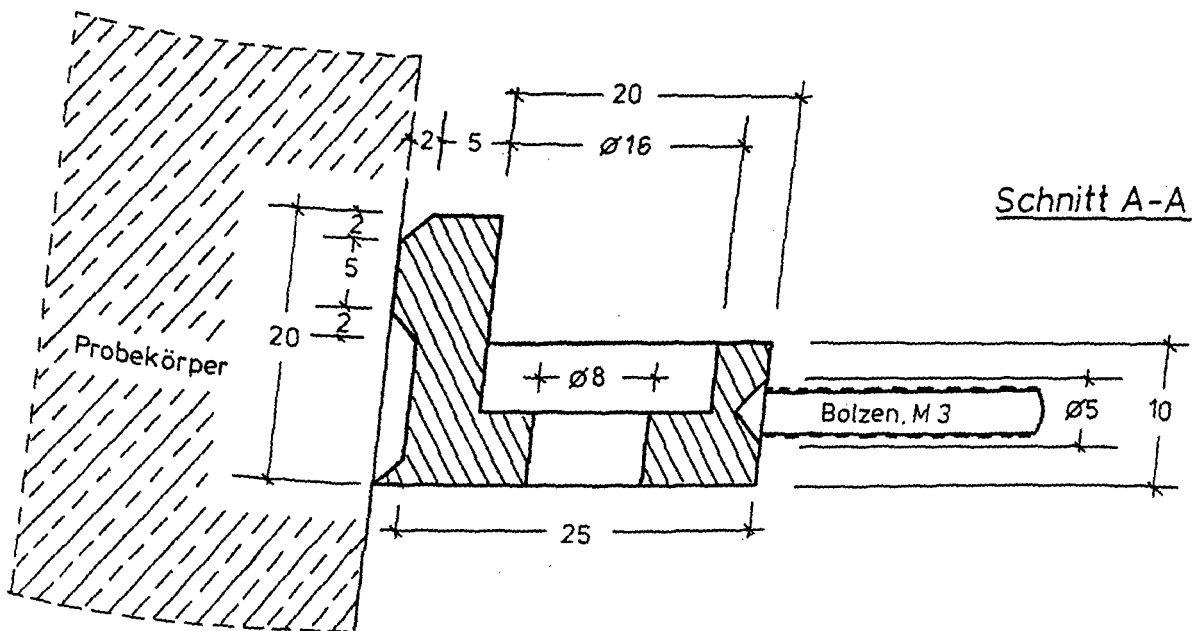
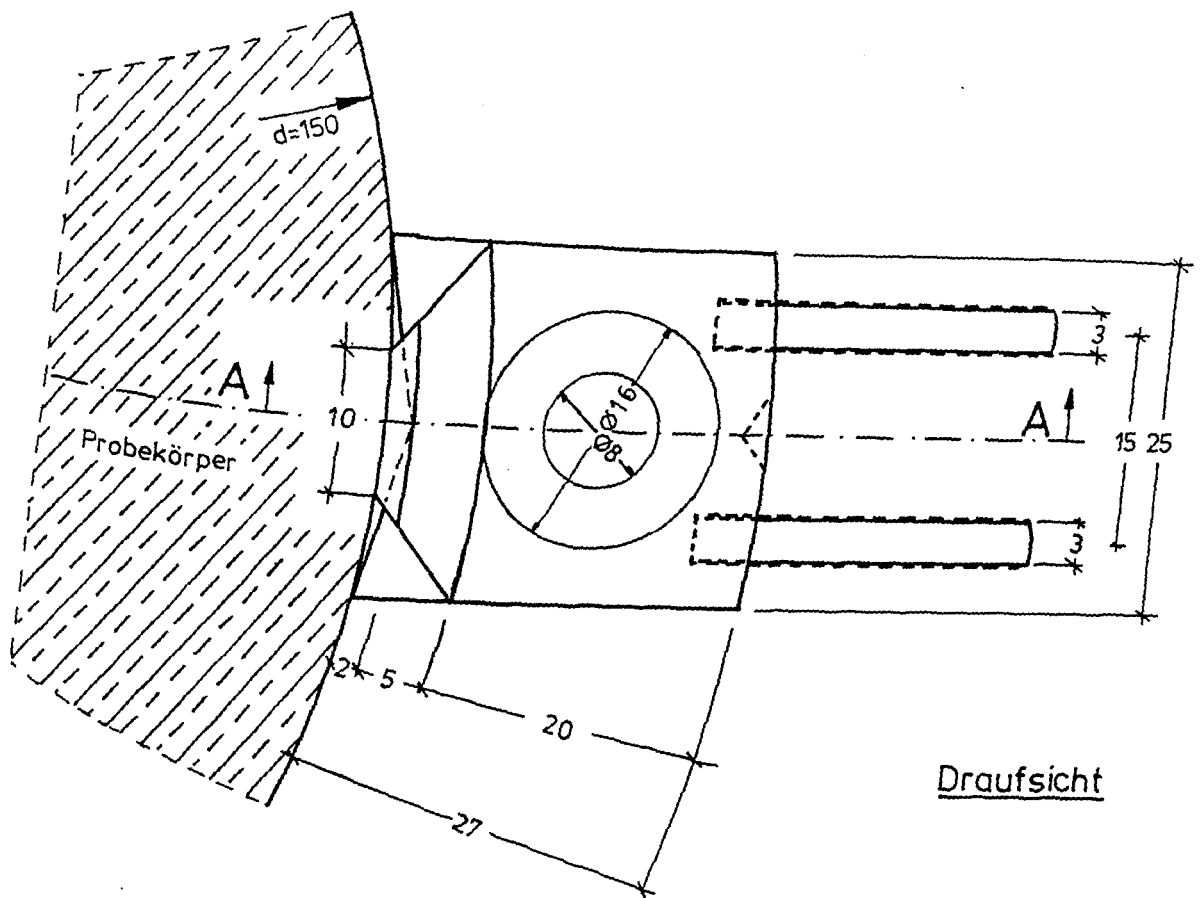
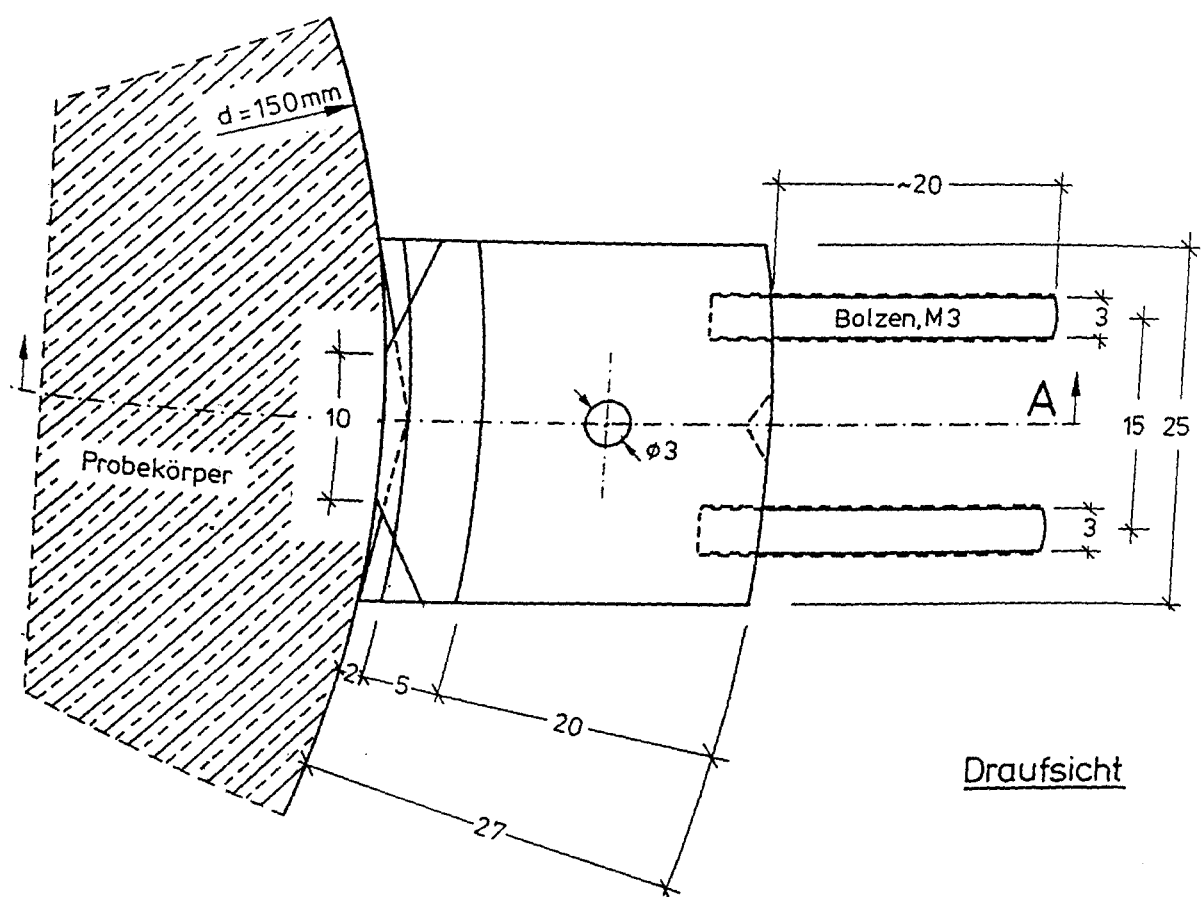
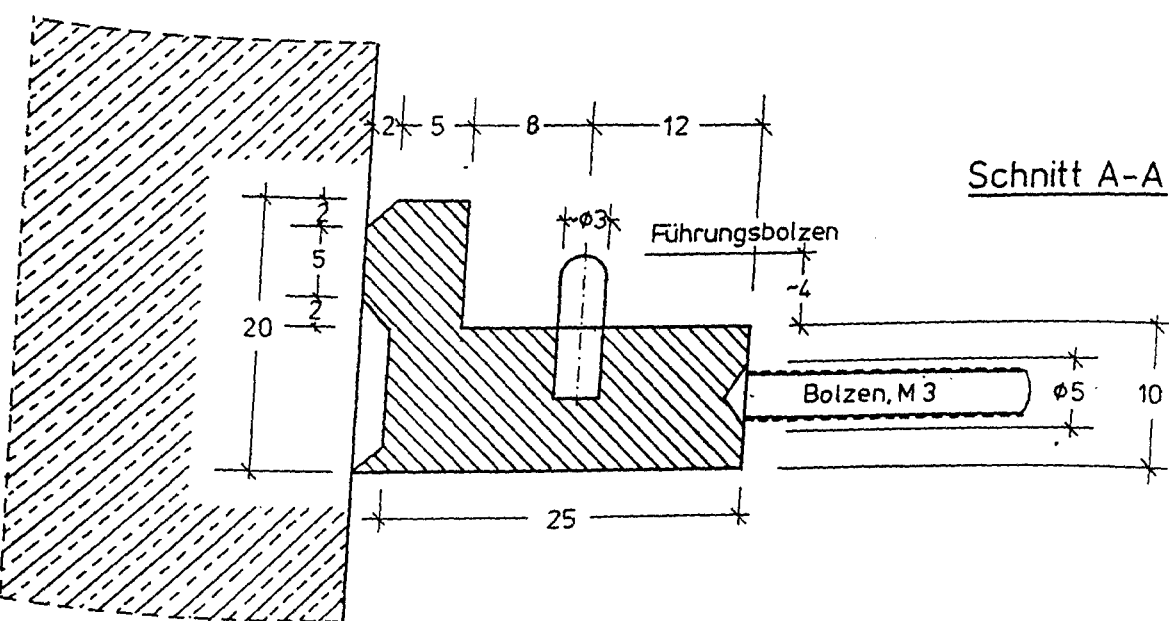


Abb. 29: Oberer Meßblock, M 2:1



Draufsicht



Schnitt A-A

Abb. 30: Unterer Meßblock, M 2:1

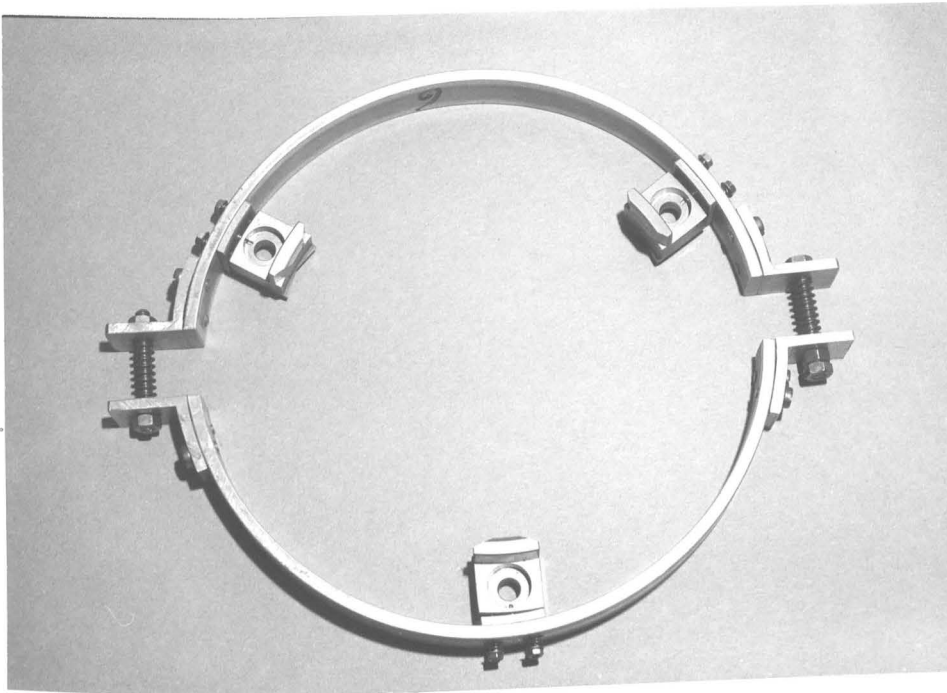


Abb. 31: Oberer Meßring (ohne Wegaufnehmer)

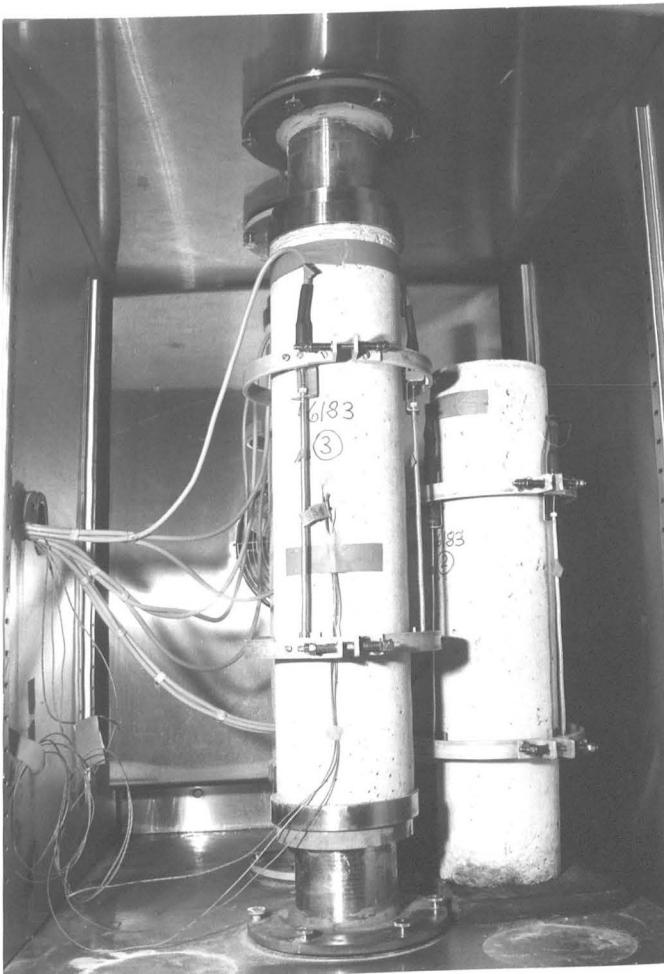


Abb. 32:

Montiertes Meßsystem auf
Probekörpern im Prüfraum

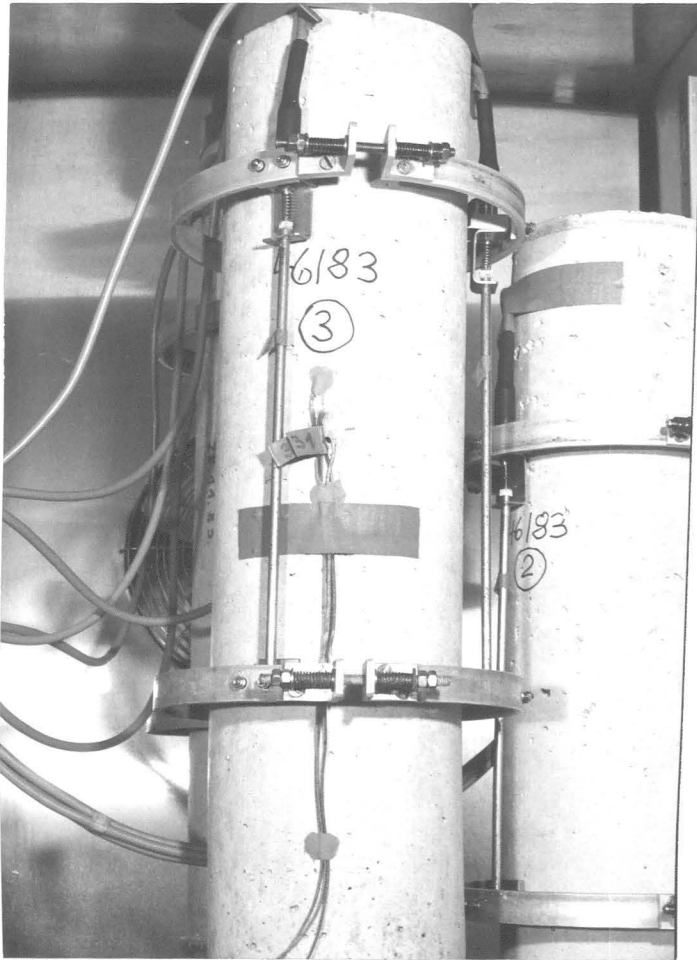


Abb. 33: Montiertes Meßsystem auf Probekörpern im Prüfraum

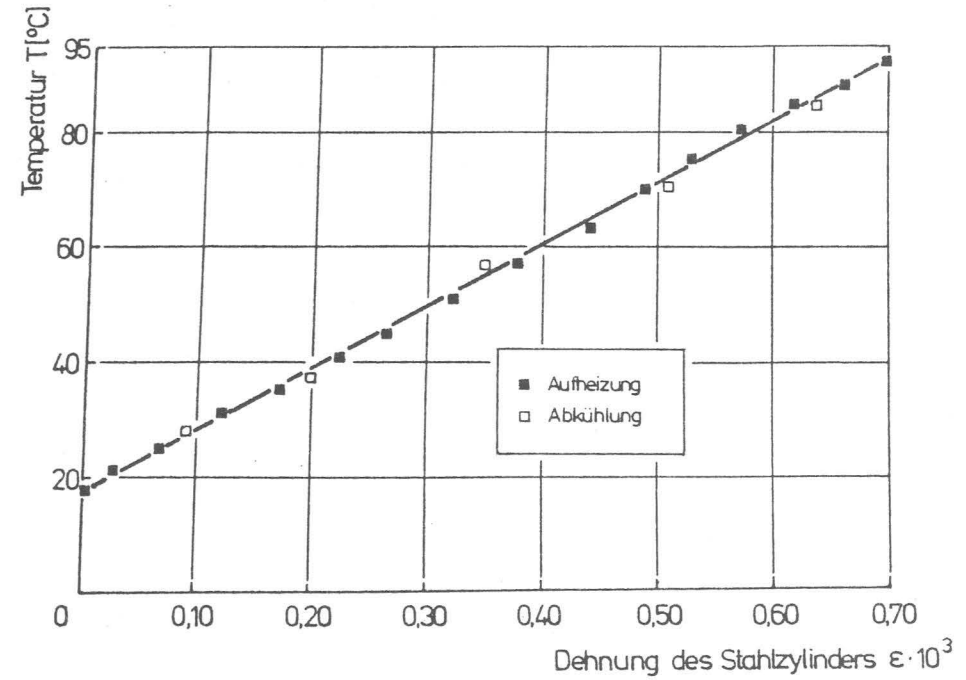


Abb. 34: Eichversuch zur Ermittlung der Temperaturdehnung des Wegmeßsystems

ANHANG

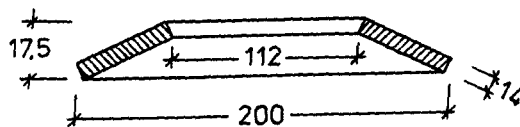
STÜCKLISTE UND KONSTRUKTIONSZEICHNUNGEN
FÜR PRÜFSTAND UND LASTEINRICHTUNG

Stückliste

für 2 hintereinander stehende Prüfsäulen in einer Klimakammer

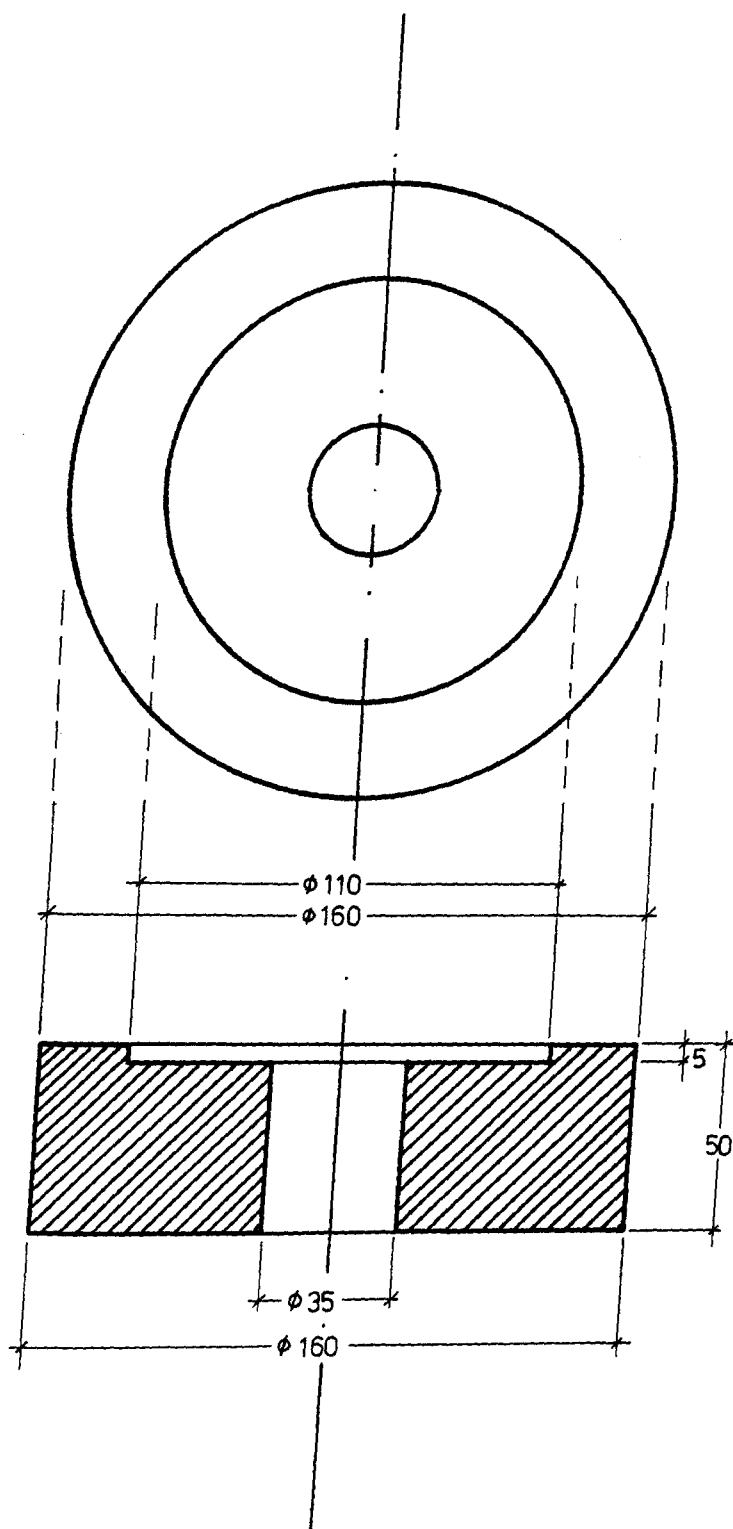
Blatt 12 enthält einen Übersichtsplan des Kriechstandes mit Positionierungen

Pos.	Beschreibung	Anz.
1	IPB 100, $l = 650$, St 37, Auflagerflächen für Pos. 2 gehobelt	2
2	[320, $l = 800$, St 37, Auflagerflächen für Pos. 2 und Pos. 9 gehobelt	2
3	DYWIDAG-Spannmutter für Zugstange $\emptyset 32$, glatt, mit aufgerolltem Sondergewinde Mutter ohne konisches Stück; $e = 55$, SW 60, (s. DWIDAG-Zulassungsbescheid Z-13.1-19 v. 1978, Anl. 7)	6
4	Grundplatte, St 37, s. Blatt 1	2
5	Führungsrohr für Tellerfedern, St 37, $d_a = 110$, $d_i = 100,2$ (aus DIN-Rohr 114,3 x 7,1 abgedreht) $l = 190$	2
6	Tellerfedern 200 x 112 x 14, $l_0 = 17,5$	5 je Säule

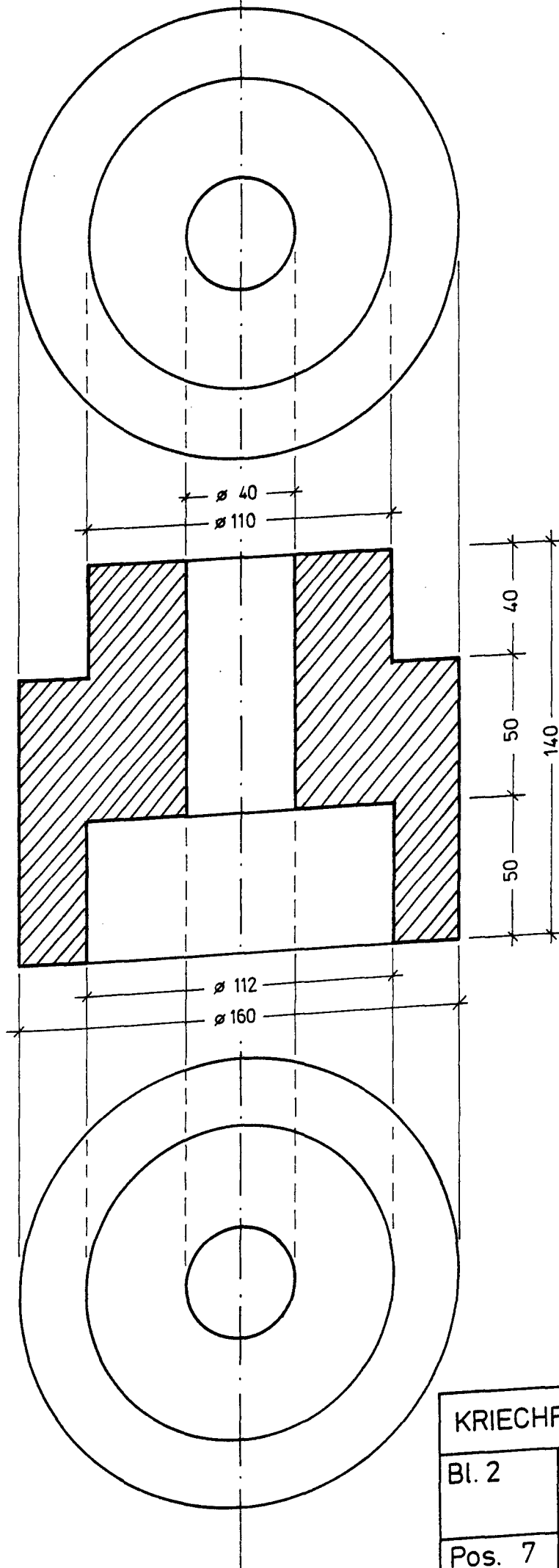


7	Feder-Druckstück, St 37, s. Blatt 2	2
8	Axial-Gelenklager, Fa. SKF: GX 45 F	2
9	Auflagerplatte, St 37, Auflagerflächen für Pos. 2, gehobelt, s. Blatt 3	1
10	Druckstempelplatte, St 37, s. Blatt 4	2
11	Mineralische Isolierplatte (MYCALEX), $t = 10$, $d_a = 148$, $d_i = 40$	4

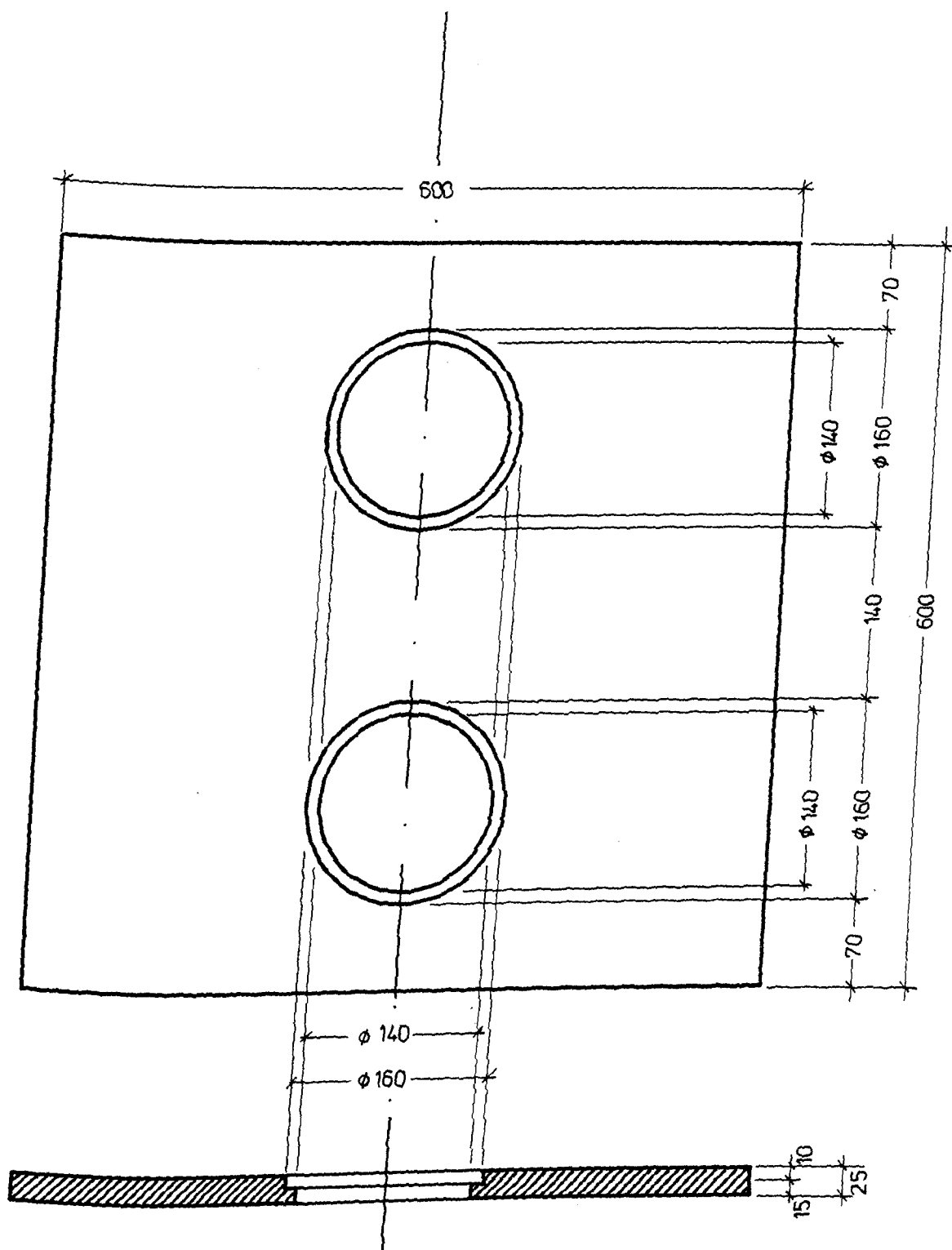
Pos.	Beschreibung	Anz.
12	Isolierter Druckstempel, Cr-Ni-Stahl, s. Blatt 5	4
13	Zwischenplatte, Cr-Ni-Stahl, s. Blatt 6	4
14	Lastplatte, St 37, s. Blatt 7	2
15	Kopfplatte, St 37, s. Blatt 8	2
16	Lastbock, St 37, s. Blatt 9	1
17	Hohlkolben-Arbeitszylinder (Fa. Lukas, LZOH 100/200-74)	1
18	Zugstange, glatt, St 1080/1230, Ø 32, mit aufgerolltem Gewinde oben und unten (DYWIDAG) Gewindelänge unten: 200 Gewindelänge oben: 400 Gesamtlänge der Zugstange: 2500	2
19	Zugstange für Lastaufbringung, wie Pos. 18 Gewindelänge unten: 100 Gewindelänge oben: 200 Gesamtlänge der Zugstange: 800	1
20	Gewindemuffe für Ø 32 (DYWIDAG, ohne Hüll- bzw. Muffenrohr	1
21	Übergangsplatte, St 37, s. Blatt 10	1
22	Ringkraftmeßdose (Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik), C 6/100 t	1
23	Kugelkalotte (Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik), C 6/100 t/ZK	1
24	Kopfplatte, St 37, s. Blatt 11	1



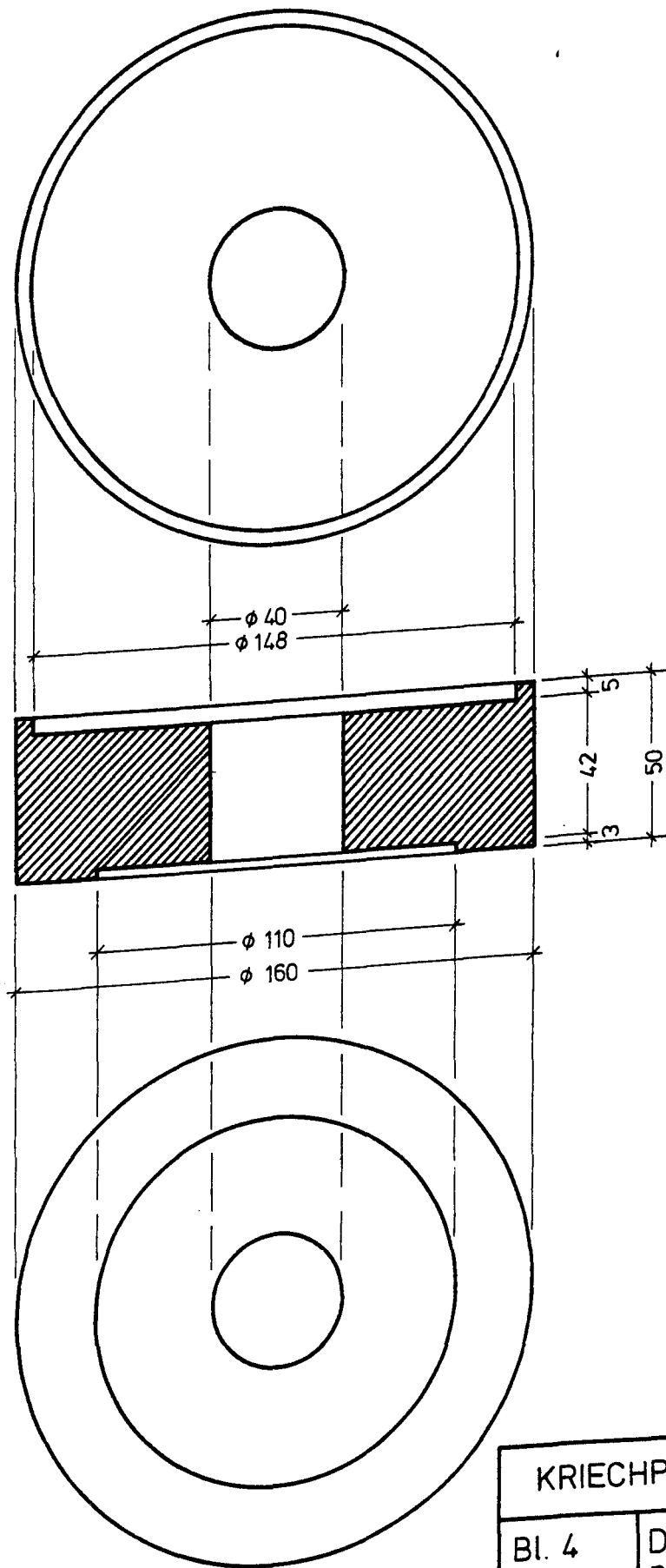
KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 1	Grundplatte	
Pos. 4	M. 1 : 2	St 37



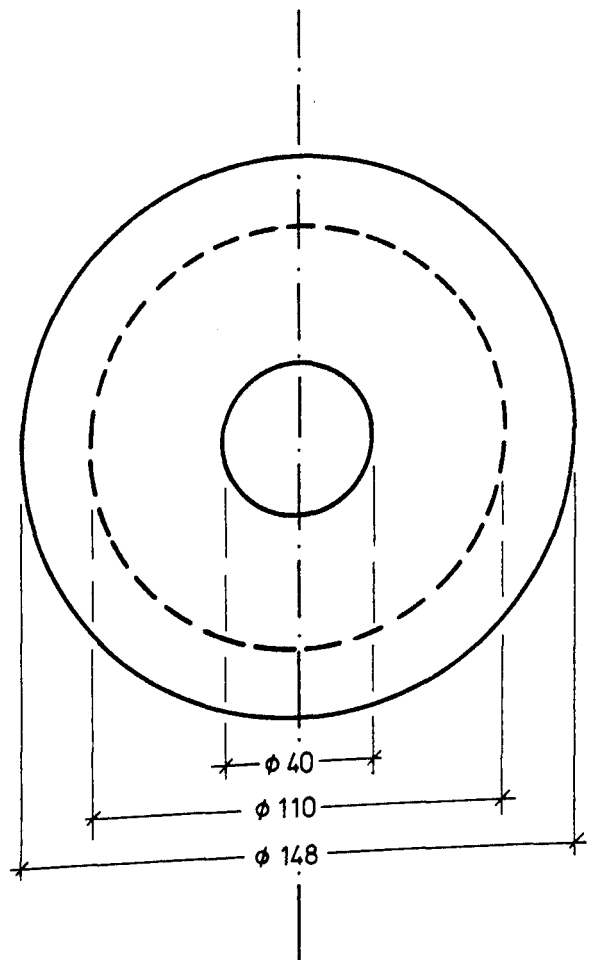
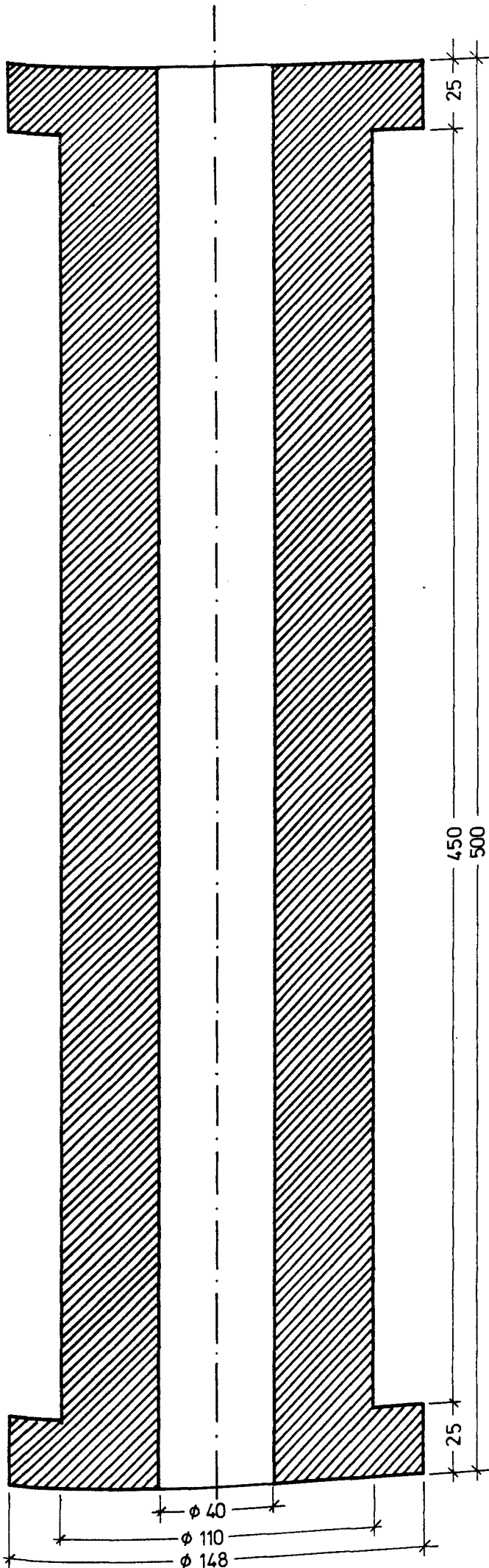
KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 2	Feder-Druckstück	
Pos. 7	M. 1:2	St 37



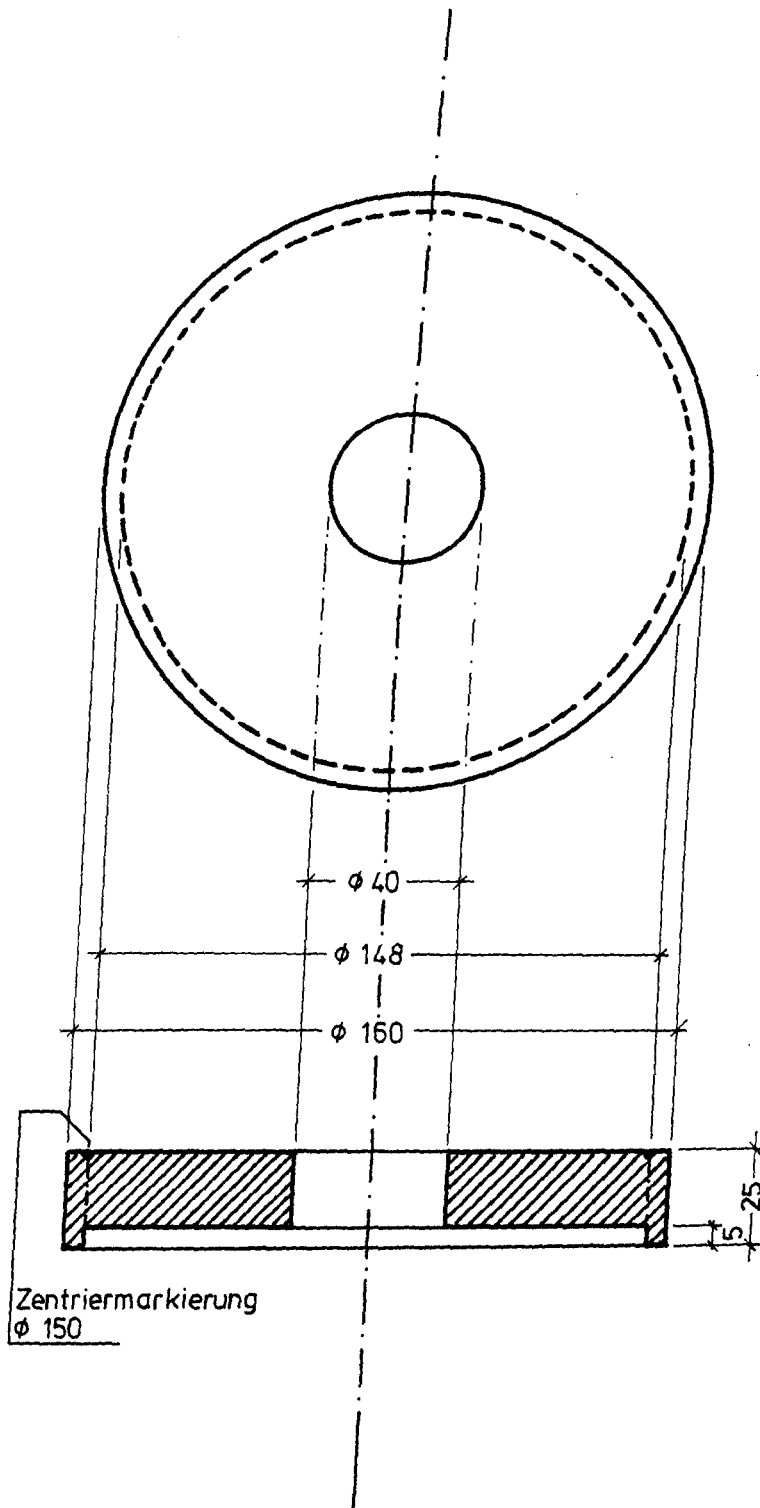
KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 3	Auflagerplatte	
Pos. 9	M. 1 : 5	St 37



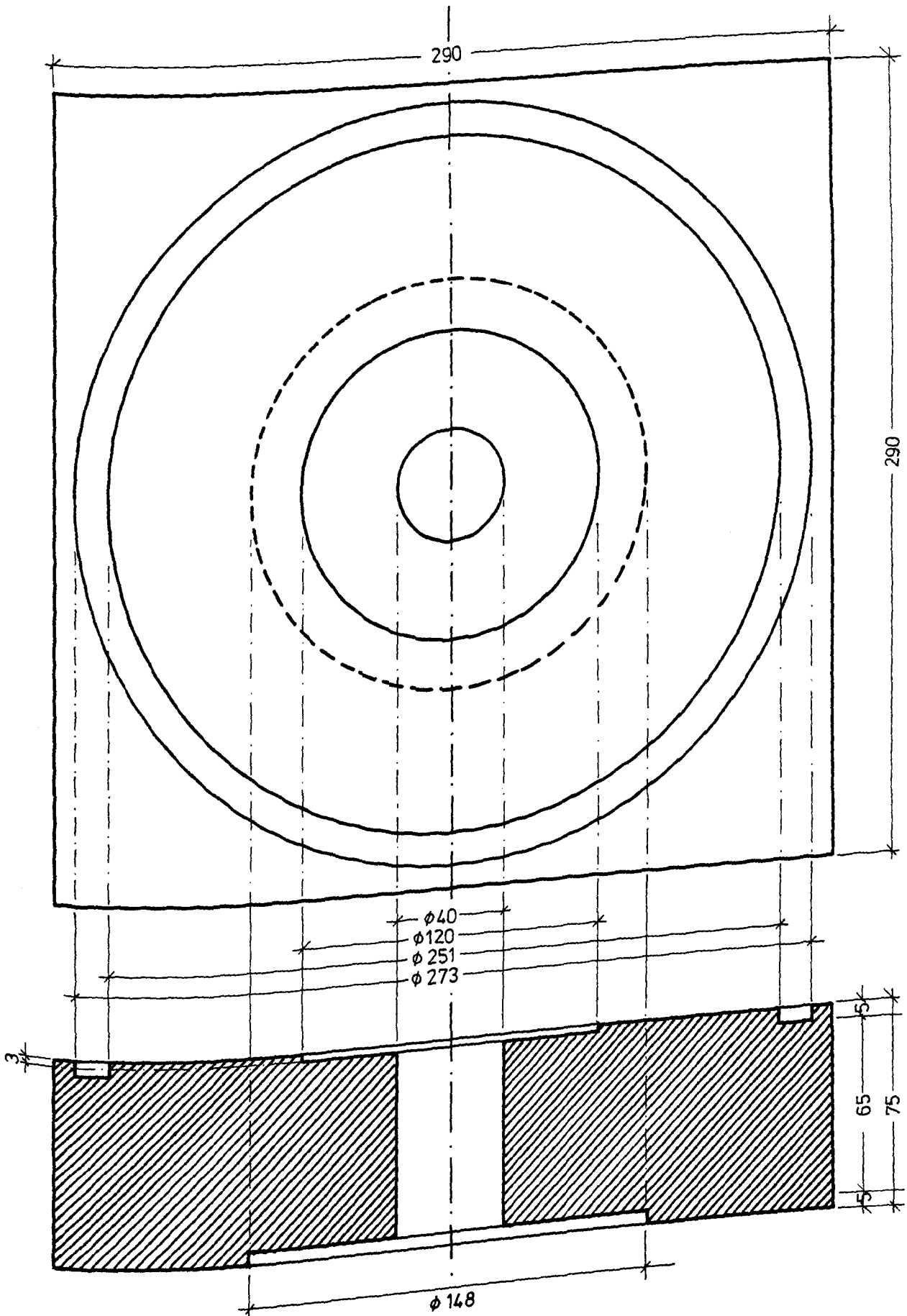
KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 4	Druckstempel- platte	
Pos. 10	M. 1 : 2	St 37



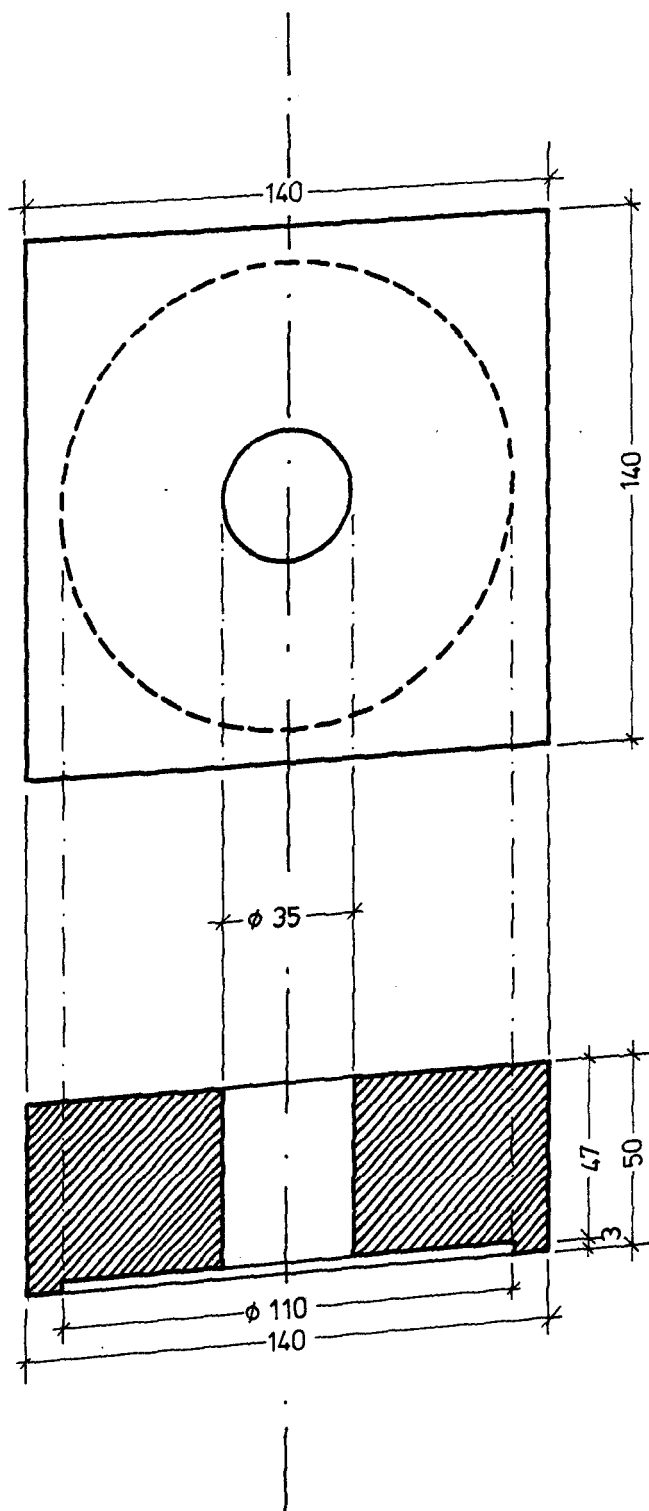
KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 5	Druckstempel	
Pos. 12	M. 1 : 2	V 4 A Werkstoff 1.4571



KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 6	Zwischenplatte	
Pos. 13	M. 1 : 2	V4A Werkstoff 1.4571

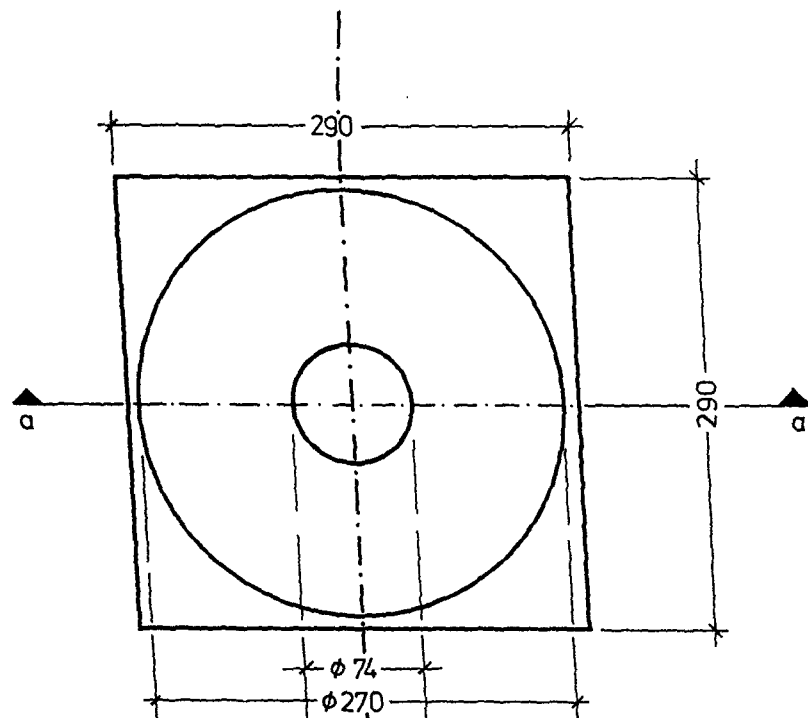


KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 7	Lastplatte	
Pos. 14	M. 1 : 2	St 37

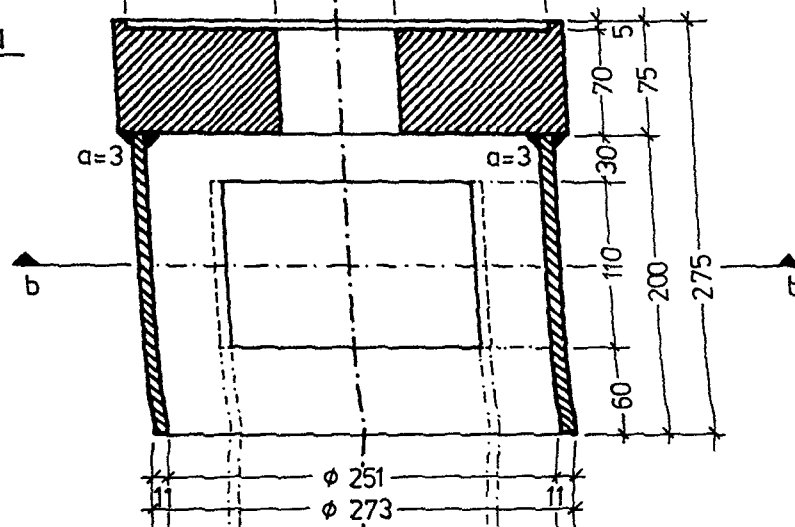


KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 8	Kopfplatte	
Pos. 15	M. 1 : 2	St 37

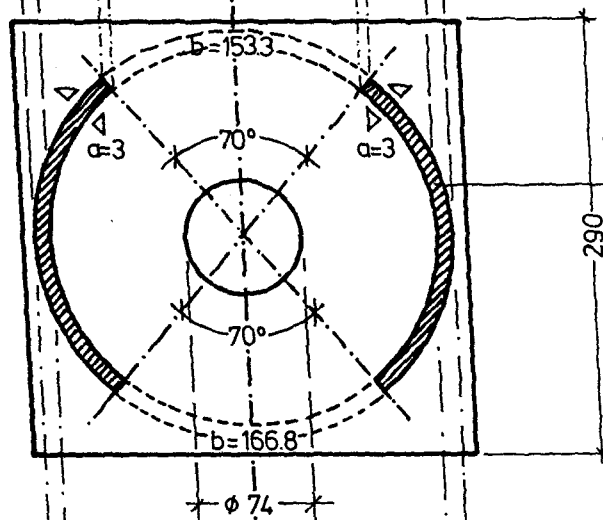
Draufsicht



Schnitt a - a

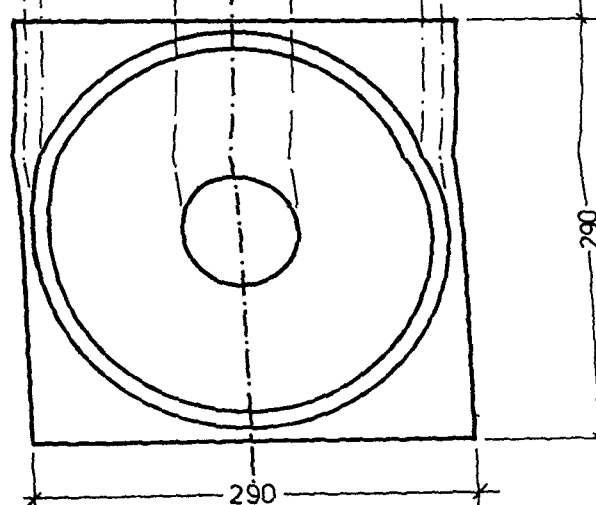


Schnitt b - b

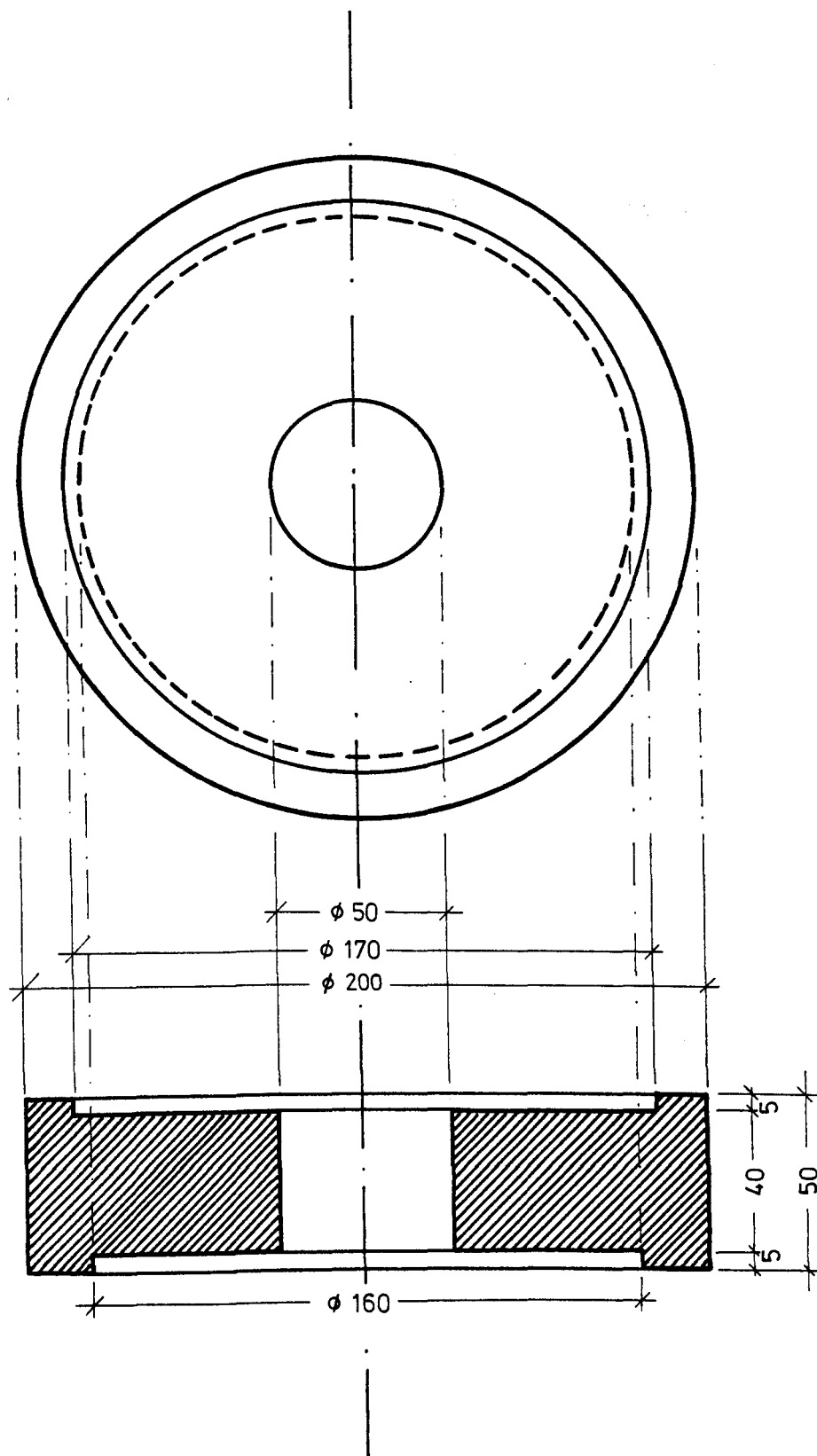


Stahlrohr DIN 4228
273 x 11

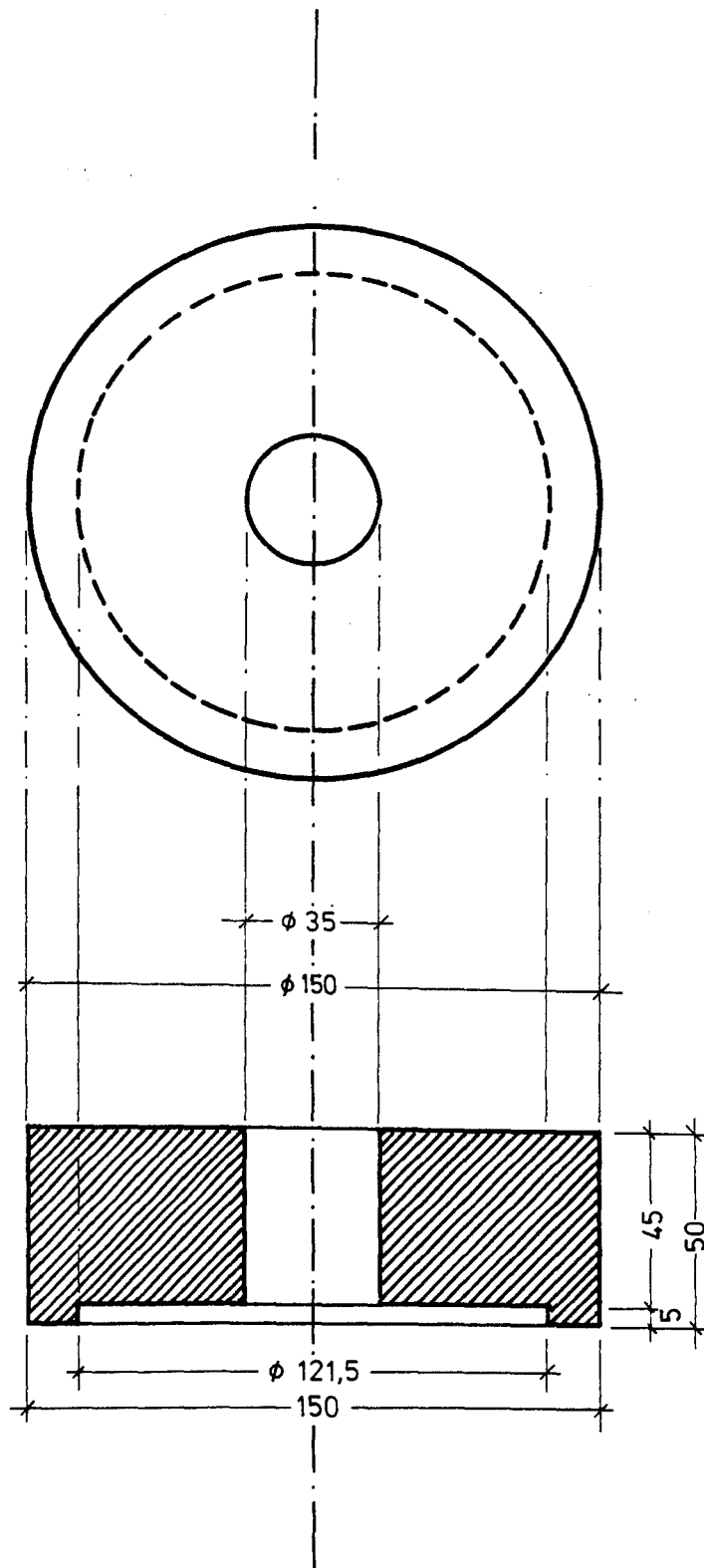
Untersicht



KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 9	Lastbock	
Pos. 16	M. 1 : 5	St 37

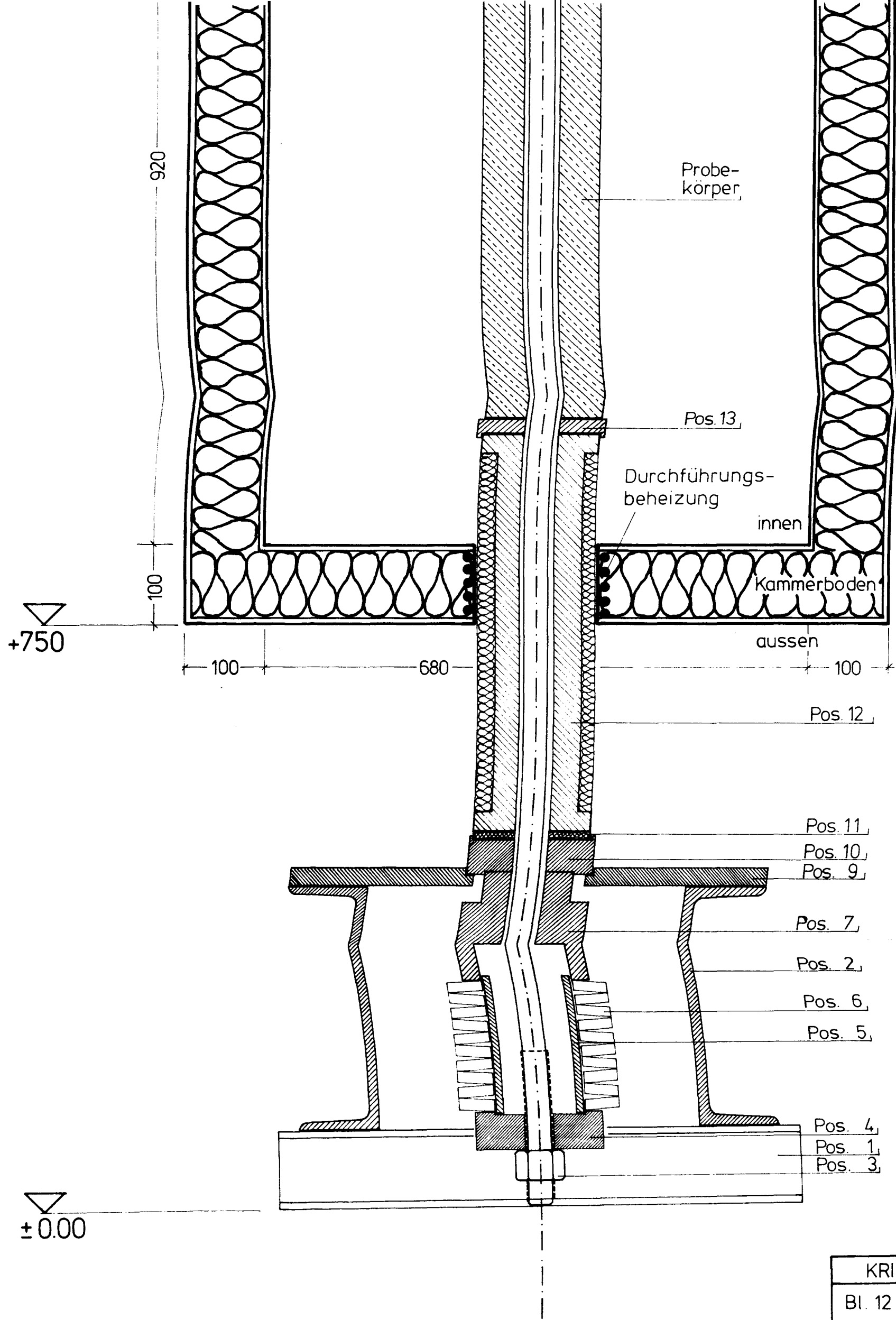


KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 10	Übergangsplatte	
Pos. 21	M. 1 : 2	St 37



KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 11	Kopfplatte	
Pos. 24	M. 1 : 2	St 37

Technical drawing of a vertical shaft assembly, showing 12 positions (Pos. 3, 24, 23, 22, 21, 17, 19, 20, 18, 16, 3, 15, 8, 14, 11, 12) along the shaft. The drawing includes a vertical shaft with various components, including bearings, seals, and structural supports. A horizontal line with a triangle symbol and the label "+2500" indicates a specific datum or reference point. The drawing is a cross-section view, showing the internal components of the shaft assembly.



KRIECHPRÜFSTAND		
Bl. 12	Übersicht	
	M. 1:5	